

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción

Mejoramiento del desempeño en la estabilización de suelos de subrasantes con cemento hidráulico en vías no pavimentadas.


Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Kenneth Alejandro Golfín Ballesteró

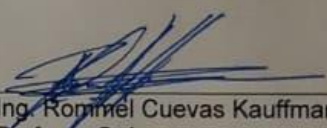
Cartago, Junio 2019.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

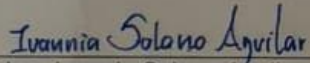
Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Rommel Cuevas Kauffmann, Ing. Ivannia Solano Aguilar, Ing. Alonso Poveda Montoya, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



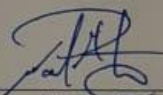
Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director



Ing. Rommel Cuevas Kauffmann.
Profesor Guía



Ing. Ivannia Solano Aguilar.
Profesora Lectora



Ing. Alonso Poveda Montoya.
Profesor Observador

Mejoramiento del desempeño en la estabilización de suelos de subrasantes con cemento hidráulico en vías no pavimentadas.

Abstract

In the present project an improvement in plastic soils is proposed through the application of hydraulic cement to subgrade in unpaved roads or ballast. This improvement is used with hydraulic cement, which is a Type MM / C (CP) 21. The areas chosen for implementation are areas with soils prone to be plastics, therefore, silt-clayey soils. The study areas for this project were the following: Los Santos, Nicoya and Pocosol. These soils already classified according to ASTM D3282-15 are: A-5 (1), A-7-5 (12) and A-7-6 (30) respectively.

The hydraulic cement is implemented in dosages of 1%, 3%, 5% and 7% of hydraulic cement by weight of the soil in the 3 zones. Modified Proctor tests were carried out for them, to find the optimal A / C ratio in each dosage.

Unconfined compression tests are carried out in which an increase in resistance is observed, as the dosage is increased. These resistances increase by at least 700%, between virgin dosages (with 0% hydraulic cement content) and 7%.

To measure the durability of the soil, CBR and Attrition tests were used, both with 7% implementation. A reduction in the plasticity of the materials is observed, by means of the application of hydraulic cement, and with this the CBR is increased.

Keywords: Improvement, subgrades, hydraulic cement, silt-clayey.

Resumen

En el presente proyecto, se plantea un mejoramiento en suelos plásticos, por medio de la aplicación de cemento hidráulico a subrasantes en caminos no pavimentados o de lastre. Este mejoramiento se emplea con cemento hidráulico, el cual es un Tipo MM / C (CP) 21. Las zonas escogidas para realizar la implementación son zonas con suelos propensos a ser plásticos, por ende, suelos limo-arcillosos. Las zonas de estudio para este proyecto fueron las siguientes: Los Santos, Nicoya y Pocosol. Estos suelos ya clasificados según la norma ASTM D3282-15 son: A-5 (1), A-7-5 (12) y A-7-6 (30) respectivamente.

Se implementa el cemento hidráulico en dosificaciones del 1%, 3%, 5% y 7% de cemento hidráulico por peso del suelo en las tres zonas. Para ellas, se realizaron ensayos Proctor Modificado, para encontrar la relación A/C óptima en cada dosificación.

Se efectúan ensayos de compresión confinada en los que se aprecia un aumento en la resistencia, conforme se aumenta la dosificación. Estas resistencias aumentan en un 700% como mínimo, entre dosificaciones vírgenes (Con contenido de 0% de cemento hidráulico) y al 7%.

Para medir la durabilidad del suelo, se emplearon ensayos de CBR y Desgaste, los dos con implementación al 7%. Se aprecia una reducción en la plasticidad de los materiales, por medio de la aplicación de cemento hidráulico, y con ello se incrementa el CBR.

Palabras clave: Mejoramiento, subrasantes, cemento hidráulico, limo-arcillosos

Mejoramiento del desempeño en la estabilización de suelos de subrasantes con cemento hidráulico en vías no pavimentadas.

Mejoramiento del desempeño en la estabilización de suelos de subrasantes con cemento hidráulico en vías no pavimentadas.

KENNETH ALEJANDRO GOLFÍN BALLESTERO

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Junio del 2019

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO	1
RESUMEN EJECUTIVO.....	3
INTRODUCCIÓN.....	5
MARCO TEÓRICO.....	6
MEZCLA SUELO-CEMENTO.....	8
MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE	9
METODOLOGÍA.....	11
MUESTREO Y REDUCCIÓN DE MUESTRAS.....	11
CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS (ETAPA 1).....	12
IMPLEMENTACIÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO EN MATERIALES DE SUBRASANTE (ETAPA 2).....	15
PRUEBAS DE DURABILIDAD EN MEZCLA SUELO-CEMENTO HIDRÁULICO (ETAPA 3).....	17
RESULTADOS	20
CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS (ETAPA 1).....	20
IMPLEMENTACIÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO (ETAPA 2).....	32
IMPLEMENTACIÓN DE CEMENTO (ETAPA 3).....	45
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	55
CONCLUSIONES.....	60
RECOMENDACIONES.....	61
ANEXOS.....	63
REFERENCIA	65

Prefacio

La Red Vial costarricense en caminos de lastre equivale a un 74,05% de la totalidad de caminos construidos entre los años 2004 y 2010, según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). Estos caminos están administrados bajo entidades como el CONAVI, MOPT y las distintas municipalidades del país. Este tipo de ruta no pavimentada tiende a sufrir cambios negativos, bajo condiciones climatológicas, especialmente en época lluviosa. En donde las precipitaciones crecen y, por ende, las lluvias abarcan gran parte del territorio de Costa Rica.

Al degradarse significativamente estos caminos por el impacto del agua y tránsito en ellos se pueden presentar escenarios en donde el camino sufra erosiones o desgaste por abrasión.

Es por este motivo en donde entra a regir una evaluación de este tipo de caminos y con que tipo de agente se pueden disminuir estos problemas, para las rutas no pavimentadas, cuya inversión no sea tan costosa y la ejecución no sea de una manera compleja. Se plantea el mejoramiento de las subrasantes, por medio de la implementación de cemento hidráulico, este bajo la marca Holcim de la empresa LafargeHolcim y cuyo nombre de venta al público es el: "Cemento Multi-Base", cuya función es estabilizar suelos y materiales granulares. Este cemento hidráulico tiene una clasificación según el RTCR 479:2015 de: Tipo MM / C (CP) 21.

Una limitación bajo suelos con comportamientos de alta plasticidad, como los limo-arcillosos, es que la estabilización requiere altos porcentajes de cemento hidráulico, mayores al 15%. Castro, P (2014) señala que, el mejoramiento puede utilizar porcentajes menores (de 1% hasta 10%) y lo que se quiere evaluar es el incremento de las propiedades mecánicas de la mezcla suelo-cemento, con la aplicación del cemento hidráulico "Multi-Base", esto por medio de ensayos.

El objetivo principal del proyecto es realizar un mejoramiento en suelos plásticos por medio de la aplicación de cemento hidráulico a

subrasantes en caminos no pavimentados o de lastre. Se utilizaron tres suelos de tres distintas zonas del país, para efectuar la implementación en distintos tipos de suelo y con ello verificar si la mezcla suelo-cemento es aplicable bajo condiciones distintas.

Para implementar la mejora de la mezcla suelo-cemento se caracterizó el material por medio de la norma ASTM D3282-15, en la cual requiere un análisis granulométrico y conocer los límites de plasticidad, para poder clasificar el suelo. Conociendo las diferentes propiedades mecánicas, se procedió a evaluar la mezcla suelo-cemento en distintos ensayos, y con diferentes porcentajes de cemento hidráulico.

Quiero agradecer a Dios por todas las bendiciones que me ha dado, como son mis padres, las personas que amo y también agradecerle por todas las oportunidades que he tenido en mi vida.

Agradecerles a mis padres que soy un reflejo de ellos y me enorgullezco profundamente de ello. Gracias por toda la paciencia en estos años, la confianza brindada, el apoyo incondicional que he tenido de ellos, todas las palabras de aliento que me brindaron en estos años y siempre anhelar lo mejor para mí. No cabe una vida para agradecer todo lo que me han dado.

Gracias a Nicole que siempre me apoyó en cualquier decisión que tomé, y a Kevin, Marvin y Stephan por poder contar con ellos siempre bajo cualquier circunstancia.

Gracias a todos los colaboradores, técnicos y profesores de la escuela de ingeniería en construcción y el CIVCO, por la atención brindada y por el esmero de tratar las dudas que surgieran en el camino de mi proyecto.

Quiero agradecer fundamentalmente, a mi profesor guía el Ing. Rommel Cuevas Kauffmann, que sin duda fue un pilar para el desarrollo de mi proyecto y por los consejos brindados a lo largo del mismo.

También agradecer a la empresa Holcim por la oportunidad de desarrollar este proyecto para ellos, y especialmente a la Ing. Laura Ramírez y el Ing. Dany Torres por la colaboración durante mi proyecto en distintos ámbitos.

Gracias a la vida por este nuevo triunfo y a las personas que estuvieron conmigo durante todo este camino.

Resumen ejecutivo

El presente proyecto, tiene como objetivo realizar un mejoramiento en suelos plásticos por medio de la aplicación de cemento hidráulico a subrasantes en caminos no pavimentados o de lastre, con ello buscar incrementar las propiedades mecánicas de estos suelos y con ello mejorar el desempeño de estos materiales granulares.

Se aplica la mejora en suelos que sean limo-arcillosos, o que tengan comportamientos plásticos, pues estos bajo condiciones climatológicas con altas precipitaciones, tienden a dañarse y ocasionar un mal servicio para el tráfico de vehículos en estas vías. Es por eso, por lo que existe la necesidad de tratar estos caminos implementando alguna solución, la cual sea económica a su vez. Es por eso por lo que se trabaja con suelos en sectores agropecuarios.

Esta solución se realiza bajo la implementación de cemento hidráulico. El cemento utilizado para el proyecto es de la marca “**Holcim**”, cuyo nombre a la venta al público es de “Cemento Multi-Base”. Este es un cemento que su función es el incrementar las propiedades mecánicas en materiales granulares. Es de Tipo MM / C (CP) 21. Este por su bajo calor de hidratación puede lograr aumentar estas propiedades mecánicas sin dañar el material granular, ya que, su fraguado es más lento.

Para el proyecto se cuenta con tres tipos de materiales de subrasantes, estos ubicados en tres zonas distintas alrededor del país. Estos se dan en la zona de Los Santos, en Nicoya y en la zona de Pocosol. Para estas zonas se desarrollaron ensayos para encontrar tanto las propiedades mecánicas como las físicas, y con ellas obtener su clasificación según la norma ASTM D3282-15 (Prácticas Estándar para Clasificación de Mezclas de Suelo-Agregado para Propósitos de Construcción de Carreteras).

Para las propiedades físicas se desarrollaron ensayos de análisis granulométrico con la norma AASTHO T-88 y ensayos de Límites de Atterberg bajo la norma ASTM D4318-17.

Con estos dos ensayos se puede clasificar el suelo. Estas clasificaciones corresponden al suelo de la zona de Los Santos como A-5 (1), para la zona de Nicoya A-7-5 (12) y la zona de Pocosol A-7-6 (30). Los suelos anteriores se clasifican como limos elásticos arenosos, pero los suelos de Nicoya y Pocosol experimentan cambios volumétricos más altos.

En la zona de Pocosol, se contó con dos suelos, uno de aspecto gris, y el otro rojizo, sin embargo, el que se trabajó con la implementación de cemento hidráulico fue el rojizo, ya que fue el que brindó propiedades mecánicas más bajas que el gris, y se quiso utilizar los suelos con menores capacidades mecánicas. No obstante, se clasificó el suelo gris de igual manera, la clasificación de este suelo es A-7-6 (34).

Con los suelos clasificados, se procedió a obtener las propiedades mecánicas de las tres zonas, para ello se desarrollaron ensayos de Proctor Modificado, bajo la norma ASTM D1557-12 y el ensayo de CBR, bajo la norma ASTM D1883-16. En ellos, se encontraron datos como la densidad seca óptima, humedad óptima del suelo y el CBR de cada uno, sin la implementación del cemento hidráulico.

Se procedió a realizar la implementación del cemento hidráulico en los materiales granulares. Las pruebas que se ejecutaron fueron Proctor Modificado nuevamente para averiguar la relación agua-cemento (A/C) óptima en cada dosificación de la zona en estudio. Cada dosificación se inició con una relación A/C de 0,5.

Asimismo, se aplicó el ensayo de resistencia a la compresión inconfiada para obtener la resistencia en cada zona, con la dosificación correspondiente. En este ensayo se logra observar que a medida que se aumenta la dosificación de cemento hidráulico, se aumenta la resistencia del material de subrasantes, y se logran encontrar incrementos de más del 700% conforme los especímenes vírgenes y al 7% de cemento hidráulico. La zona con mayor

incremento en la resistencia fue la zona de Pocosal, seguidamente de la zona de Los Santos.

Con estos dos parámetros determinados, se escoge cuál dosificación brindó los mejores resultados para desarrollar pruebas de durabilidad en la mezcla suelo-cemento. La dosificación utilizada fue al 7%, con ello, se realizan ensayos de CBR nuevamente y el ensayo por abrasión bajo la norma ASTM C131/131M-14. En esta se conoce el porcentaje de desgaste de los materiales de subrasante en cada zona, para previamente medir si cumple con estándares nacionales, como lo es el “Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010)”.

En la prueba de CBR en los especímenes vírgenes, no se logra obtener resultados, ya que la carga aplicada es tan baja que el CBR tiene un comportamiento tendiendo a 0, y no se logra ubicar algún resultado. De esta manera los CBR bajo la implementación al 7% si arrojaron datos precisos y elevados, con CBR mayores a 15. Es entonces, que se determina que el cemento hidráulico bajó la plasticidad de los suelos por el incremento de estos CBR.

La prueba de desgaste refleja que los suelos de las zonas de Pocosal y Nicoya sí logran estar bajo los estándares nacionales, como lo es el “Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010)”, lo cual indica que el desgaste por pérdida de peso no debe ser mayor al 50%, consecuentemente, esto demuestra que la resistencia y la durabilidad no están directamente vinculadas entre sí. Puesto que la resistencia del suelo de Nicoya es inferior a la de la zona de los Santos, se demuestra que la durabilidad por desgaste sí cumple con el suelo de Nicoya, con un desgaste del 48% aproximadamente, y el desgaste de la zona de Los Santos es superior al 60%.

También se desarrolló una propuesta del proceso constructivo, si se deseara implementar esta mejora bajo condiciones reales en campo. En él, se reflejan puntualmente los pasos a seguir para poder aplicar esta mejora en cualesquiera zonas.

Introducción

Entre 2004-2010 en Costa Rica, según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) indica que el país cuenta con una red vial de una longitud aproximada de 39.039 km, los cuales los caminos de lastre equivalen a un 74,05%. El informe es el último actualizado, el cual se elaboró en el año 2010.

Dada la gran cantidad de kilómetros de red vial no pavimentada, surge la necesidad de intervenir con una propuesta de mejora a esta tipología de rutas. Por ello, el objetivo de este proyecto es realizar un mejoramiento del desempeño de los caminos no pavimentados, específicamente, aquellos que se encuentren a nivel de subrasante.

Por consiguiente, el estudio se aplica donde estos caminos son prioritarios para actividades comerciales, lo cual, corresponde a las zonas donde se realizan actividades agropecuarias como lo es la piña, palma, caña de azúcar, banano, entre otros. Son zonas propensas a suelos muy arcillosos, ya que los suelos son beneficiosos para la cosecha de estos productos. Sin embargo, los caminos por los que la maquinaria, ya sea vehículos livianos o de carga, transportan su producto, normalmente se ve afectado por sus capacidades de poder brindar un buen servicio, puesto que el suelo no lo permite, ya sea por las condiciones ambientales que no se presentaron de manera adecuada y con ello el suelo, por ser de un tipo limo-arcilloso, tenga una condición muy plástica e impida el ingreso. Esto afecta la productividad de la zona.

No obstante, la aplicación de esta mejora a los suelos críticos (haciendo referencia a críticos, donde los suelos o cualquier tipo de material granular que tenga un comportamiento, como los limos arcillosos, y por ello, muy plásticos, se le adjudican propiedades mecánicas que poseen resistencia deficiente y una deformabilidad alta) se pueda ejecutar en múltiples escenarios donde se obtenga un comportamiento en la condición de los suelos similares y este puede ser ejecutado.

Por lo tanto, se toma la decisión de brindar un diseño de un mejoramiento con la aplicación de cemento hidráulico en las subrasantes. Esta mejora se puede realizar simulando una unicapa que, según Quintilla, C (2007), se define como “una estructura de pavimento de una sola capa, construida utilizando el suelo existente en la rodadura de un camino, mezclado y compactado con un porcentaje de cemento hidráulico.” Por ello, de esta forma se puede realizar una vía donde las condiciones ambientales no afecten tan perjudicialmente, como lo sería si no tuviera protección alguna y que se pueda transitar con condiciones superiores bajo una solución económica.

Puesto que, una opción para la estabilización de suelos plásticos es utilizar un cemento hidráulico, se procede a realizar el proyecto de graduación en conjunto con la empresa **Holcim**, esta empresa es líder en la producción de cemento hidráulico, con sus diversos productos, estos atienden y cubren una gran área en la construcción. Actualmente, esta empresa cuenta con un producto llamado “Multi-Base”, este producto quiere atender estos escenarios, para que de una manera eficaz se solucione el problema, por lo que, se utilizará este cemento hidráulico para analizar el comportamiento de este producto en la mitigación del problema de los caminos.

Por lo tanto, se realizará un estudio de los suelos en estos sectores, para poder realizar una mejora en sus subrasantes y con ello verificar la duración que este puede obtener a la hora de ser implementado. Las pruebas se realizarán bajo los parámetros que rigen las normas ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, traducido al Español) y AASTHO (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes, traducido al Español).

Por lo anterior, se toma como objetivo general el mejorar el desempeño de las subrasantes mediante la aplicación de cemento hidráulico en caminos no pavimentados o de

lastre. Con ello establecido, se realiza una serie de objetivos específicos en los cuales, el proyecto pueda cumplir con el objetivo y las limitaciones del caso.

- Caracterizar tres tipos de materiales de subrasante en vías no pavimentadas mediante la norma ASTM D3282-15.
- Evaluar la condición de los suelos caracterizados con la aplicación del cemento hidráulico.
- Evaluar la durabilidad en distintos ensayos.

La durabilidad de los materiales de subrasante se determinó por medio de dos ensayos, el primero es el ensayo de CBR (Relación de Rodamiento de California, traducido al Español) el cual nos da origen a un índice que se determina para las distintas capas de material granular en un pavimento. El segundo ensayo consiste en una prueba de desgaste, esta se determinará bajo la norma **ASTM C131/131M-14** y en la ejecución de la prueba, se ajustarán parámetros para reproducir una metodología del ISCYC (Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto)

Una limitación del proyecto fue que no se logra construir tramos de pruebas para poder implementar la mejora con la mezcla de suelo-cemento, con la intención de poder replicar los resultados de laboratorio en el tramo de prueba, ya bajo condiciones reales. Estos tramos para poder visualizar resultados confiables de la implementación deberían considerar las dos épocas del año, tanto la lluviosa como la seca. Con el propósito que el tránsito vehicular impacte en la subrasante bajo estas dos condiciones señaladas.

Marco Teórico

El proyecto por emplear, se basa en la mejora de una subrasante con cemento hidráulico, por ello, se define primeramente lo que es la subrasante, que consiste en el suelo en su estado natural, en el cual se colocan, ya sea para una estructura de pavimento, las capas en el orden respectivo; subrasante, sub-base, base y por último la capa asfáltica o de concreto hidráulico.

Por ello, teniendo en cuenta que esta estructura se basa en los grosores de las capas mencionadas, sin contemplar la subrasante, y tomando en cuenta las propiedades mecánicas de estas mismas, cabe destacar que, con una subrasante mejorada, sus propiedades estructurales se aumentan, y por ello, se logra disminuir el grosor de las capas siguientes.

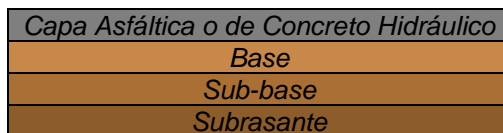


Figura 1. Estructura típica de un pavimento

Uno de los problemas más cotidianos en caminos no pavimentados son los suelos arcillosos, pues estos por su gran plasticidad presentan problemas a la hora de transitar en él, normalmente estos son de tipo limo-arcilloso.

Por ende, al contemplar que la subrasante se mejoraría con cemento hidráulico, cabe la necesidad de desarrollar unos ensayos preliminares para conocer dichas propiedades estructurales que se exteriorizaran más adelante.

Según Gómez, Gillin, Gallardo (2016); enfatizan en que los suelos que constituyen la subrasante pueden ser cohesivos, granulares o una mezcla de ambos; en el primer caso no se cuenta con una adecuada estructura que permite desarrollar una buena resistencia y una baja deformación, pues se componen de partículas finas y muy pocas partículas gruesas, que no alcanzan a estar en contacto entre sí.

Estos suelos, normalmente, si no son tratados, en ellos puede crecer lo que es la capa vegetal, y normalmente en sectores agropecuarios son de

muy buen uso para la cosecha, por su tipo de suelo. Este se ajusta perfectamente a la actividad de agricultura, y este sector de la población, en muchos casos, los caminos por los que transitan sus vehículos para recolectar el producto en cosecha, son caminos no pavimentados por el alto gasto que conlleva pavimentar caminos, ya sea por asfalto o concreto hidráulico y no pueden afrontar económicamente este pavimentado.

La aplicación de la mejora se da en tres zonas del territorio costarricense. Estas se seleccionan, a partir de la cosecha, la historia de la zona con respecto al suelo de esta misma y la relación que había entre la empresa “**Holcim**” y los propietarios (as) de la zona. Ya que, el contacto con ellos (as) era fundamental para poder obtener la muestra del suelo, puesto que el camino donde se obtendría la muestra iba ser dañado, por ende, la importancia de la comunicación entre la empresa y el propietario (a). Por ello, se llega a la conclusión de que las zonas serían las siguientes: la Cima de Dota en la zona de los Santos, Pocosol en Alajuela y en Dulce Nombre de Nicoya.

Estos lugares se pueden ver mejor reflejados en el siguiente mapa:

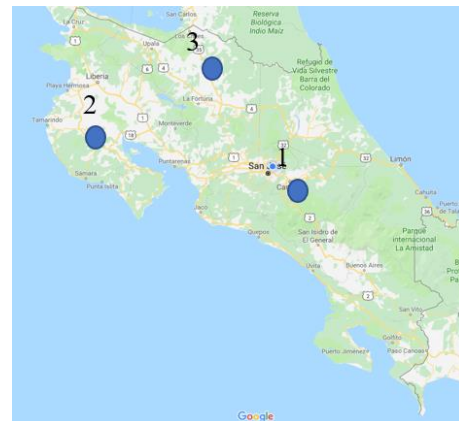


Figura 2. Zonas de estudio.

Fuente: Google Maps.

En la figura anterior, se muestra con los puntos azules los lugares de donde se obtuvo la muestra para los ensayos. La numeración de dichos lugares se da de acuerdo con el orden con el que se fueron recolectando las muestras en las respectivas zonas.

En las zonas mencionadas anteriormente, la cosecha en cada zona es distinta, por lo que se puede expresar según la siguiente tabla:

Tabla 1. Cosechas de respectiva zona.

Zona	Cosecha
Los Santos (1)	<ul style="list-style-type: none"> • Papa • Fresa • Hortalizas
Nicoya (2)	<ul style="list-style-type: none"> • Producto principal es el melón • También producen: <ul style="list-style-type: none"> +) Arroz +) Sandía
Pocosol (3)	<ul style="list-style-type: none"> • Piña

El mejoramiento que se va a realizar sería una mezcla de suelo-cemento hidráulico, a escala de laboratorio por medio de un proceso experimental, por lo cual, se explicarían ambas partes de la mezcla y las partes relacionadas al total de la mezcla. En cómo influye en la aplicación y cuál es la función de este componente en el mejoramiento.

Mezcla Suelo-Cemento

Se conoce que el mejoramiento será aplicado en las subrasantes mencionadas anteriormente, por lo que, el material principal es el suelo, estos se pueden dividir en suelos finos, como lo son limos y arcillas y también suelos gruesos, el cual son las arenas y gravas. De esta manera Toirac (2008), señala de una manera más técnica que el suelo es un material trifásico, lo que quiere decir que está compuesto por una fase sólida, líquida y gaseosa, el cual se origina de la erosión o desintegración de las rocas.

Su otra parte es el cemento hidráulico, que es un aglutinante a base de una mezcla de Clinker y yeso, este compuesto llamado Clinker, es la mezcla de varios minerales, los cuales se unen calentándolos y llegando al punto de fusión para que se origine un solo compuesto homogéneo. Para este proyecto se realiza la mezcla con un cemento distinto, este según el “Reglamento Técnico RTCR 479:2015 Materiales de Construcción, Cementos Hidráulicos”, dice que es un tipo **MM / C (CP) 21**.

Esto quiere decir que es un cemento hidráulico modificado mixto, el cual cuenta con un porcentaje de Clinker entre el 45% y 64%, el cual dice en su grado de sustitución. Además, sus componentes principales serían la caliza y

materiales puzolánicos. Por último, presenta una resistencia a los 28 días de 21 MPa.

Este cemento lleva el nombre de “Multi-Base”; como lo menciona la ficha técnica de Holcim, dice que es un cemento el cual sirve para la estabilización o mejoramiento de suelos y materiales granulares, tiene varias funciones puntuales:

- Reduce el riesgo de bombeo de finos.
- Reduce el riesgo por agrietamiento por contracción.
- Reduce los espesores de las capas de bases de los pavimentos.
- Mayor durabilidad y resistencia a agentes atmosféricos.

Entonces, es un cemento apto para el mejoramiento en caminos no pavimentados, y por ello se plantea el proyecto, sobre la mejora en estos mismos, el cual lleva una serie de ensayos los que se discutirán ampliamente en la metodología.

De igual manera existen distintos métodos de estabilización o mejora para suelos o materiales granulares. Higuera, Gómez, Pardo (2012), mencionan mediante una tabla, distintos tipos de métodos con el respectivo proceso de estabilización.

Tabla 2. Métodos de estabilización o mejora de suelos.

Tipo de Método	Estabilización
Mecánica	Compactación
Física	Granulometría Suelo betún
Fisicoquímica	Suelo-cal
Química	Suelo-cemento

Fuente: Higuera, Gómez, Pardo (2012)

En la tabla 2, se observa que el mejoramiento propuesto es un tipo de método químico, pues al ser el cemento hidráulico un compuesto que reacciona con el agua, este, al entrar en contacto con el suelo y realizar la mezcla previa, se empieza a hidratar y forma un intercambio iónico formando enlaces entre ellos. Estos enlaces se fortalecen luego del proceso de rigidización, ya fraguado el aglutinante (Cemento Hidráulico) empieza el endurecimiento y es ahí donde aumenta con el tiempo la resistencia. Como se menciona anteriormente, el curado es importante a la hora de efectuar cualquier mezcla que contenga cemento hidráulico, ya que, es un

proceso de hidratación continua de la mezcla, que se hace para evitar pérdida de agua por evaporación y, con ello garantizar las especificaciones de diseño de la mezcla.

Mejoramiento de Subrasante

Las pruebas para la obtención de las propiedades físicas y mecánicas se dan según las normas ASTM y AASTHO, indicadas más adelante. Estas son instituciones en donde se estandarizan ensayos para poder replicarlos y con ello obtener resultados confiables, quiere decir que hay ensayos para determinar calidad de los materiales, comprobar si cumplen con parámetros de diseño o para obtener un resultado con la que se pueda diseñar. Con el equipo especificado en dicha norma y una serie de pasos a realizar, se logran obtener resultados confiables para la aplicación que haya sido escogida.

Propiedades Físicas

En este apartado, se logra caracterizar los suelos, con una serie de ensayos, y, con ello, se determina el tipo de suelo y su clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el cual pertenece a la ASTM 3282; y la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes, la cual fue traducida por sus siglas en inglés (AASTHO).

La serie de ensayos se puede representar por medio de una tabla, con el fin de mencionar el tipo de ensayo y su respectiva norma utilizada. Estas son:

Tabla 3. Ensayos con sus respectivas normas

Ensayos	Norma
Límites de Atterberg	D4318-17
Granulometría	T88
Gravedad Específica	D854-14
Hidrómetro	T88

En la tabla 3, las pruebas mencionadas, permiten determinar las características físicas y con esos datos, se puede interpretar qué tipo de suelo estamos tratando, a la hora de realizar la mejora, por medio de una clasificación de estos mismos.

Esta clasificación, nos permite filtrar estos suelos dentro de 7 grupos ya establecidos por las instituciones (ya sean ASTM o AASTHO). En estos grupos se pueden obtener comportamientos que pueden generar los suelos clasificados. No obstante, se deben realizar ensayos para determinar las propiedades mecánicas, ya que un diseño no se puede realizar conociendo únicamente la clasificación de un suelo.

Propiedades Mecánicas

Las pruebas de ensayos mecánicos generan datos, que sirven para el diseño o la ejecución de la obra en su momento, dan resultados confiables para continuar o empezar un proyecto constructivo. Por ello, son datos que se necesitan siempre y se eligen qué ensayos pueden brindar mayor información para el desempeño del suelo en acción y de igual manera la mezcla suelo-cemento hidráulico. Los ensayos realizados se observan en la siguiente tabla con la respectiva norma:

Tabla 4. Ensayos con sus respectivas normas

Ensayos	Norma
Proctor modificado	D1557-12
CBR	D1883-16
Abrasión	C131/C131M-14

Durante estos mismos ensayos se realiza la prueba de resistencia a la compresión confinada, la cual indica la resistencia última a la compresión, este se puede medir en kg/cm² o en MPa.

Para el mejoramiento, se toman distintos porcentajes de cemento, que se da por peso de suelo. Un sistema llamado SSIS, el cual traducido al Español es el "Sistema de Índice de Estabilización del Suelo". Es un sistema que se genera en Texas, Estados Unidos, el cual sirve para determinar la idoneidad de un suelo, y con ello ver qué tipo de estabilizador es el más adecuado para usarlo en el suelo en estudio. Para este sistema, solo se consideró cal, estabilizadores bituminosos y cemento portland.

Además, el estudio del sistema SSIS se basa en la recopilación de información, para que cualquier persona en el ámbito ingenieril (y no solo expertos en el área de estabilización) le sea de

utilidad. Por lo tanto, ellos generan una figura donde se logra conocer según las características del suelo, qué estabilizador es el recomendable.

Como se expresa en el anexo 2, se necesita realizar un análisis granulométrico del material y, además, conocer sus límites de Atterberg, para seleccionar un tipo de estabilizador. Al optar por un mejoramiento se usan porcentajes de cemento entre un 1% a 5%, una dosis mayor de cemento en la mezcla se puede considerar una estabilización, la cual se basa dentro de un 5% a 20%.

Para comprobar la durabilidad de los diseños de mezcla, se utiliza una parte de la metodología del ISCYC, el cual es el “Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto”. Es una metodología que aplica el ICCYC (Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto) para pavimentos unicapa. El ICCYC, dice que es una alternativa de mejora para la red en lastre del país. Por lo tanto, aplicaron esta metodología a pavimentos unicapa. Quintilla, C (2007), expresa que un pavimento unicapa es una estructura de pavimento de una sola capa, la cual es construida con el suelo natural y existente en el camino, y es mezclado y compactado con un porcentaje de cemento hidráulico en dosis del 11% al 20%.

Metodología

Previo al inicio del proyecto, se realizaron varias reuniones preliminares, con la empresa LafargeHolcim, para indicar las zonas, donde se realizaría la implementación de cemento hidráulico en los materiales de subrasante correspondientes, asimismo conocer cuál iba a ser la dosificación máxima de cemento hidráulico que se aplicaría. De igual manera, los ensayos mencionados en el marco teórico, se aplicaron en las tres zonas de estudio y, por lo tanto, las figuras que se reflejen, corresponderán en algunos casos, solo al de una zona. Igualmente, las medidas que se utilizan en las normas, para parámetros como los moldes, cantidades, equipo, instrumentos, entre otros, sobrellevan incertidumbres en las mismas. En consecuencia, se indicará una medida estándar para el caso que sea necesario.

El cálculo de humedad que es necesario para ensayos físicos o mecánicos, se basa en la norma ASTM D2216-19, donde se especifica que las muestras se ingresan a hornos, con una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, y se dejan por 24 horas para el primer pesaje y una hora después otro pesaje, en donde la diferencia entre las dos, no superen el 0,1%, se acepta y si no es así, se deja por otra hora, y así consecutivamente, hasta que cumpla.

Muestreo y reducción de muestras

Se efectuaron visitas de campo a los lugares indicados en la figura 2 del marco teórico. Por ello, estas visitas al campo se realizaron tomando en cuenta las normas, que indican métodos o técnicas para tomar una muestra confiable en campo. Estas normas son las siguientes:

- ASTM D75/D75M-14 (Prácticas Estándar para Muestreo de Agregados, traducido al Español).
- ASTM D3665-12 (Prácticas Estándar para el Muestreo Aleatorio de Materiales de Construcción, traducido al Español).

Con las normas anteriores, se procede a realizar una hoja de Excel, en donde se logre obtener muestras confiables en campo, esta hoja se logra observar en el apéndice 1. En dicha hoja, se realiza un incremento, el cual sirve para poder realizar el muestreo en distintas partes del camino y no focalizarse en un solo sitio.

En el apéndice 1, se completa con unos datos generales de la zona, y tiene un espacio vacío, en la parte de “ubicación del camino a muestrear”, en donde se puede colocar una imagen de dicho camino, eso sí, se debe contar con la ubicación precisa del camino. Ya en campo se mide la longitud del carril por el cual se obtendrán las muestras y el ancho. Esto con el fin de poder aplicar incrementos de número del 0 al 1, y por ello, se genera un número aleatorio, el cual puede ser obtenido de la calculadora con la opción de “Random”, o bien utilizar la tabla de la norma ASTM C3665-12. Este número aleatorio debe ser menor al incremento, y ya con ello se multiplica por la longitud y el ancho del carril. Al final se obtiene un muestreo confiable del lugar escogido. Se muestra un ejemplo del cálculo mencionado, por medio de la tabla.

Tabla 5. Cálculo de longitud y ancho de carril.

Longitud del carril (m)			Ancho del carril (m)			
200			3,5			
Cantidad de kg total aprox.			250 - 300			
Tabla para ejecución del muestreo	Muestra	Incremento	# Aleatorio	Long (m)	# Aleatorio	Ancho (m)
	1	1	1	200,0	1	3,5
	2	0,8	0,702	140,4	0,702	2,5
	3	0,6	0,565	113,0	0,565	2,0
	4	0,4	0,331	66,2	0,331	1,2
	5	0,2	0,12	24,0	0,12	0,4
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-

Como se denota en la tabla 5, este es un ejemplo de cómo se determinó la ubicación de los puntos a muestrear en la longitud del camino, para este caso se aplicó para cinco muestras, que, en total, las cinco muestras logran una cantidad entre 250 kg y 300 kg.

Luego ya con las muestras de distintos puntos en un mismo camino, se aplica la norma **ASTM C702/C702M-18**, donde se procede a realizar el método B, de cuarteado, para realizar una sola muestra compuesta, y que sea lo más representativo del campo, para que no haya alteraciones en los ensayos procedentes.



Figura 3. Reducción de muestra.

En la figura anterior, se aprecia el procedimiento de reducción de muestras. La primera etapa, consiste en mezclar todo el material como se menciona anteriormente, esto con el fin, también, de disminuir la humedad natural. Luego, se procede al cuarteado, el cual como se observa en la tercera parte de la figura, se cuarteo la cantidad de veces necesaria para obtener la muestra con una cantidad determinada de acuerdo con el ensayo a ejecutar.

Las muestras de las tres zonas se pueden apreciar en la figura 4, para observar el tipo de suelo en campo, previo a los ensayos.



Figura 4. Suelo en estado natural.

Cabe destacar que en la zona de Pocosal se contó con dos tipos de suelo. Uno rojizo, como se aprecia en la figura y uno de aspecto visual gris. Para el material rojizo ya se contaba con una caracterización previa por un laboratorio. Al suelo gris sí se le aplicaran los ensayos de propiedades físicas. Sin embargo, la implementación de cemento hidráulico, se aplico al suelo rojizo.

Todo el proyecto se divide en tres etapas. La primera, es conocer las propiedades mecánicas y caracterizar las muestras de suelo de las tres zonas de estudio. La segunda etapa, es la aplicación del cemento en las muestras de suelo, y con ello, poder definir cuál es la mejor dosificación y relación agua/cemento (A/C) que genera la mezcla óptima. En la etapa tres, se realizan pruebas en las muestras tratadas para obtener información de la durabilidad y desempeño de las mezclas en campo.

Caracterización de los suelos (Etapa 1)

Obtenidas las muestras y reducidas a las cantidades correspondientes para la ejecución de los ensayos, se procede a ejecutar el análisis granulométrico, según la norma **AASHTO T-88**, la cual establece el procedimiento, para determinar la parte retenida en el tamiz #200, y esta se deriva

en otros tamices más finos; con exactitud los tamices por los cuales se aplica el procedimiento serían los siguientes:

- 4,76 mm (#4)
- 2,00 mm (#10)
- 0,84 mm (#20)
- 0,42 mm (#40)
- 0,15 mm (#100)
- 0,07 mm (#200)

Para las tres muestras, se tomó una cantidad aproximada de 450 g. Esto porque, de los suelos analizados, ninguno contaba con una parte retenida en el tamiz #4, y por ello no se necesitó realizar el análisis de agregado grueso, únicamente el fino fue analizado. De esta muestra se puede obtener la humedad del suelo en ese momento, para luego, sumergir el material en agua por un periodo de veinticuatro horas. Sumergido este, se aplica la norma **D1140-17**; el cual dice que es un lavado por el tamiz #200, con el cual se desprenden las partículas más finas de las más gruesas y, con ello, el análisis granulométrico va a ser más confiable, sin perder material fino, como limos y arcillas. Lavado el material se procede al secado, igualmente por veinticuatro horas, con el fin de determinar que la muestra esté seca en su totalidad.

Posteriormente, se procede al tamizaje, el cual consiste en verter el suelo en los tamices de apertura más grande a la más pequeña, hasta llegar al tamiz de abertura de 0,07 mm (#200). El material pasando el tamiz mencionado, se suma con el material lavado por dicha malla. Luego, la relación en pesos del material previo al análisis, junto con el material ya distribuido por los tamices, no puede superar al 1%. Este procedimiento se puede observar en la figura 5.



Figura 5. Procedimiento Granulometría.

Al análisis granulométrico se le calcula el error del mismo y el porcentaje pasando el tamiz #200. Luego, se realiza un ensayo con el hidrómetro, el cual consiste en una prueba de precipitación, para la efectuación de este ensayo, se necesita una muestra representativa entre 50 g

y 100 g aproximadamente. Se sumerge en una solución de hexametáfosfato de sodio por dieciséis horas mínimo. Además, se necesita una humedad higroscópica de esa muestra representativa. La medición consiste en tomar lecturas a un tiempo determinado para observar la velocidad de precipitación de las partículas finas. En esta prueba se necesita aplicar otro ensayo para conocer la gravedad específica del material. Esta se logra determinar por medio de la norma ASTM D854-14, la cual se genera con la utilización de un picnómetro y un instrumento para remover el aire dentro del picnómetro, y con ello reducir los espacios vacíos a lo mínimo que se necesite.

Por efectuada la granulometría, se inicia con el ensayo de límites de Atterberg, bajo la norma ASTM D4318-17. Aquí se conocerán los límites líquidos, límites plásticos y, por ende, los índices de plasticidad. Para esta prueba se ocupan aproximadamente 200 g de suelo pasando el tamiz de abertura de 0,42 mm (#40). Por lo tanto, consiste en obtener al menos entre 450 g y 500 g, de una muestra de suelo representativo, para posteriormente aplicar el tamizaje.

Este ensayo consiste en dos partes. La primera es obtener el límite líquido y la segunda el límite plástico. Para el límite líquido, se necesita la utilización de la copa de Casagrande, en donde se coloca la muestra de suelo, para preparar el suelo ya tamizado, se necesita ir colocando dosis pequeñas de agua gradualmente, para ir obteniendo un suelo viscoso. En la figura 6, se aprecian los límites ya elaborados y la diferencia en la ejecución de ambos. Este suelo ya preparado con las dosis de agua, se coloca en la copa de Casagrande como se denota en la norma, y se realiza una abertura en la mitad de la copa (dicha abertura se aprecia en la figura 6). Consecutivamente, se realizan los golpes, y se contabilizan los golpes hasta cerrar la abertura; la velocidad de estos golpes debe ser de un promedio de dos golpes por segundo.

Los golpes que se ejecutan para cerrar la abertura, y que con ello se efectúe un canal de 13 mm (esto se indica de una manera más clara en la norma ASTM D4318-17) deben ser de treinta y cinco a veinticinco golpes, treinta a veinte golpes y veinticinco a quince golpes. En cada ciclo se toma una muestra de la copa de al menos, 15 g. Cabe destacar, que en el primer ciclo se toma de la muestra preparada una cantidad de 30 g aproximadamente para el desarrollo de los límites plásticos. Por ende, se necesita generar tres

puntos en los límites líquidos y a ellos se les debe obtener la humedad. Consiguientemente, cada punto deberá ser más húmedo y por ello se cerrará más rápido. Ya obtenidos los tres puntos con sus humedades, se proyecta la curva de flujo, de manera lineal y en escala semilogarítmica, en la cual, se debe calcular la ecuación de la recta, y con ello se procede a obtener la humedad a veinticinco golpes exactamente. Y ese sería el límite líquido.

La muestra de suelo de 300 g se divide en dos, para obtener dos puntos y se determina un promedio de ambos, el cual corresponde al límite plástico. La norma del ensayo indica que para determinar el límite plástico se deben realizar bastones de 3,2 mm de diámetro, en un vidrio rugoso, para permitir que, el suelo pierda humedad, hasta tal punto que los bastones se quiebran y no se logran moldear de nuevo. Los bastones de 3,2 mm se almacenan en un horno, para previamente obtener su humedad.



Figura 6. Límites líquidos y plásticos

Con ambos límites conocidos, se realiza un cálculo sencillo, el cual es la resta del límite líquido con el límite plástico, y este resultado da a conocer el índice de plasticidad, el que refiere al tipo de suelo y diferentes aspectos del proyecto. Para el suelo de la zona de Pocosol, al contar con dos tipos de suelo, se le aplicó dicha prueba a los dos tipos, para contemplar si en el suelo rojizo, sus límites, eran similares o iguales, a los límites desarrollados por el laboratorio CACISA, y con ello confiar en los datos brindados en el informe.

Obtenidos los resultados de las pruebas de granulometría y límites de Atterberg, se puede proceder con la clasificación del suelo según la norma ASTM D3282-15. Esta norma, se basa en los porcentajes pasando los tamices #10, #40 y #200 y el límite líquido e índice de plasticidad. Con

estos datos, se logra determinar qué tipo de suelo se está ensayando.

Se realiza el cálculo del índice de grupo que le pertenece a cada tipo de suelo, ya que puede variar, aunque el suelo sea el mismo, este índice indica la calidad del suelo con respecto a los otros.

Proctor Modificado

Esta prueba se puede ejecutar de dos maneras: Proctor Estándar y Proctor Modificado. La diferencia entre ambas es la energía de compactación, la cual se transfiere por el mazo que se utilice. En el Proctor Estándar, el mazo es más pequeño y menos pesado; con una energía de compactación de 600 kN-m/m^3 ($12400 \text{ ft-lbf/ft}^3$) mientras que el modificado es más pesado y más grande. En este caso se va a hablar del Proctor Modificado, ya que fue el utilizado en la prueba.

El Proctor modificado cuenta con un mazo de 457,2 mm de altura y una fuerza de golpe de 44,48 N. Por ende, una energía de compactación de 2700 kN-m/m^3 ($56000 \text{ ft-lbf/ft}^3$). Para identificar que método utilizar en este ensayo, se debe determinar por medio del análisis granulométrico, ya que cuenta con tres métodos, entre los cuales varía el molde y los golpes. El molde puede ser de 10,16 cm. (4 in) ó 15,24 cm. (6 in) de diámetro. No obstante, las capas en los tres métodos son de cinco capas por molde. Los golpes pueden ser de veinticinco golpes por capa, para los métodos A y B o cincuenta y seis golpes por capa, para el método C. Lo anterior se verifica con los porcentajes pasando y retenidos en las mallas de 9,5 mm. (3/8) y 4,75 mm. (#4).

En este caso, para las tres zonas de estudio, se trabaja con el método A, porque el material tiene un 100% pasando el tamiz #4 y por eso se utiliza el molde de 10,16 cm. (4 in), a veinticinco golpes por capa y cinco capas por molde, para el inicio de la prueba se utilizan aproximadamente 3,5 kg. por punto. Un punto se le llama a un molde ya efectuado por completo. Consecuentemente, la prueba ocupa como mínimo tres puntos para determinar un resultado confiable, y, entre más puntos se realicen, más confiable será el resultado.



Figura 7. Instrumentos y materiales utilizados en prueba Proctor Modificado.

Para realizar un punto se necesitan los instrumentos que se muestran en la figura 7. Se explicará el método por pasos puntuales:

1. Se preparan bolsas de suelo ya tamizado por la malla #4, en este caso se prepararon siete bolsas para efectuar siete puntos si fuera necesario.
2. Medición de los moldes o molde a utilizar. Estas medidas deben ser sin el collar y tomado desde el platón. Se toma la altura y diámetro del molde. Al menos tres mediciones para obtener un promedio de volumen. También se ocupa el peso del molde.
3. Tomar un porcentaje de agua en peso del suelo. Por ejemplo, si el suelo son 3000 g, un 10% de agua por peso de suelo será de 300 ml de agua. Esta agua se mezcla en el suelo hasta obtener una mezcla homogénea sin concentraciones de agua en algunos puntos.
4. Se ingresan pequeñas cantidades de suelo al molde para formar una capa a la vez; cabe destacar que, en este caso, el molde si lleva el collarín. Esta capa se compacta con el mazo y se le aplican veinticinco golpes. Al manipular el mazo se debe utilizar toda la altura del mazo, se escucha un golpe cuando ya no logra subir más, y es ahí donde se deja caer por gravedad.
5. Al completar las cinco capas, el suelo tiene que estar una pulgada por encima del collarín.
6. Luego, con la ayuda de un cuchillo o desatornillador plano, se desgasta las paredes del molde para poder retirar el collarín y enrasar el suelo en el molde.

7. Se toma el peso del molde más el suelo. Luego se extrae el suelo del molde con la ayuda de un pistón.
8. Se desgasta la muestra moldeada de suelo y se saca una muestra del núcleo para ingresarlo al horno. Se obtiene la humedad de este punto y se realizan los cálculos necesarios.



Figura 8. Muestra de suelo luego de haber realizado la prueba Proctor Modificado.

Todos los puntos necesarios para obtener la curva de Proctor se realizan repitiendo los pasos del tres al ocho variando en cada muestra, el porcentaje de agua. Esta variación puede ser dentro de un rango del 2% y 3% de agua por peso de suelo. En la figura 8, se observa una muestra ya moldeada, junto con la obtención del núcleo, ya realizados todos los puntos, se ingresan al horno para la obtención de la humedad, y con los cálculos ya realizados, se logra determinar el contenido de humedad óptimo del suelo para alcanzar su densidad seca máxima.

Implementación de cemento hidráulico en materiales de subrasante (Etapa 2)

Se aplicaron implementaciones de cemento hidráulico, en porcentajes de 1%, 3%, 5% y 7%. Estos porcentajes se definieron, ya que la implantación iba ser aplicable a un mejoramiento en los materiales de subrasante, y como se definió en el marco teórico, estos porcentajes oscilan entre el 1% y 10%. Es por ello, que se define un porcentaje máximo al 7%, resumidamente, se dan estos porcentajes para determinar el aumento en sus propiedades mecánicas, sin necesidad de que la aplicación de la mejora tenga un peso muy elevado en el ámbito económico, y con ello verificar si con el cemento hidráulico de Holcim, llamado "Multi-Base", se logra obtener un aumento

en sus propiedades mecánicas, con bajas dosificaciones de cemento.

Como bien se señaló en el capítulo de marco teórico, según el “Sistema de Índice de Estabilización del Suelo” confirma que el cemento mezclado con el suelo, para los tipos de suelo que se va a aplicar la mejora, sí es un método válido. Teniendo en cuenta lo anterior, se inicia con la etapa de implementación del cemento hidráulico.



Figura 9. Implementación de cemento hidráulico.

En la figura 9, se expresa cómo se muestra la colocación del cemento hidráulico, en la mezcla de suelo-cemento. Luego de haber realizado la mezcla suelo-cemento, se procede a realizar un ensayo Proctor Modificado, pero alterado, pues en esta se utiliza la humedad óptima del suelo, pero el cambio se da en que se varía la relación agua/cemento (A/C). Por ello, la relación A/C se va variando, como si fueran las dosificaciones de agua que se utilizan para conocer la humedad óptima.

En dicho caso, se van a encontrar humedades óptimas para los distintos porcentajes de cemento que se apliquen en los suelos. Sin embargo, estas humedades óptimas nos indican la relación A/C recomendable, de los diseños de mezcla propuestos a cada zona. Esta prueba se

realiza de la misma forma en la que se indica en el apartado de Proctor Modificado, solo se debe tomar en cuenta que se debe hacer la corrección de agua por humedad del suelo en su estado natural. El suelo cuenta con una humedad en sitio y este se debe restar del total de agua que conlleva a la humedad óptima. Se realizó una iteración del desmoldeo, previo a la efectuación de los moldes. Esto con el fin de determinar un correcto desmoldeo, para que el molde cilíndrico no sufra daños. En estos se varió el contenido de desmoldante (vaselina) que se colocó en los moldes y también las horas de fraguado, entre dieciséis y veinticuatro horas.

Teniendo la relación A/C óptima de los diseños de mezcla, se plantea la realización de cilindros para la falla por compresión inconfiada. Estos cilindros se moldean en los moldes usados para Proctor Modificado, los cuales son de 10,16 cm. (4 in), bajo el mismo procedimiento: cinco capas por molde y veinticinco golpes por capa. Ya moldeados se extraen con el pistón hidráulico, y esta extracción se debe hacer con cautela, quiere decir que se debe cerciorar que la placa que se utiliza para el empuje del suelo quede ocupando la totalidad del suelo, ya que es esta la que puede ocasionar daños en el cilindro. El cilindro no puede ser dañado para que los datos brindados por la falla, sean confiables. En la figura 10, se visualiza como debe aplicarse la extracción y se denota la muestra ya realizada con la mezcla de cemento hidráulico y colocado en la maquina Tester.



Figura 10. Extracción de moldes y falla a la compresión.

El curado que llevó todos los moldes de la mezcla suelo-cemento, para la falla a la compresión inconfiada, fue de siete días. Estos siete días inician con veinticuatro horas de curado en molde al ambiente, solo que cubierto para que

este no pierda humedad. Esto se hace para que fragüe el cemento. Y los siguientes seis días, se ingresan a una cámara húmeda, donde el ambiente es controlado continuamente y su temperatura oscila en 22°C, la humedad relativa en la cámara es de un 99,9%.

Pruebas de durabilidad en mezcla suelo-cemento hidráulico (Etapa 3)

Conociendo los datos brindados de la etapa 2, inicia la etapa 3. La cual se divide en dos pruebas. La primera es el ensayo de CBR (Relación de Rodamiento de California, traducido al Español), que se indica en la norma ASTM D1883-16. La segunda es una alteración al ensayo de abrasión, indicada en la norma ASTM C131/131M-14, ya que las revoluciones de la máquina de los Ángeles, la norma específica 500, y se elaboró con 200 revoluciones. En dicha prueba se consideran lineamientos que indica la metodología del ISCYC (Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto). Para esta etapa, se utiliza únicamente la mezcla óptima de suelo-cemento en cada zona.

Para el CBR, se moldean tres cilindros iguales, estos bajo la misma energía de compactación y capas por molde, su variedad son los golpes por capa. Los cilindros de CBR deben ser de 15,24 cm. (6 in) de diámetro y una altura de 17,78 cm. (7 in). Esta altura tiene que tener contemplado un collarín de por lo menos 5,05 cm. (2 in). Al realizar el moldeo, se debe colocar un espaciador de 6,14 cm. (2,416 in), y el diámetro de este debe ser de 15,08 cm (5,94 in).

Con el equipo se inicia el moldeo, estos se realizan aplicando la misma metodología del Proctor Modificado, con la implementación de cemento hidráulico, su variante son los golpes por capa, porque para el primer cilindro se efectúan cincuenta y seis golpes por capa, para el segundo veinticinco golpes por capa y el tercero diez golpes por capa. Además, estos cilindros llevan unas pesas por encima del suelo, que en total deben pesar 4,54 kg. (10 lbf), que aplican una fuerza al suelo moldeado.

Al momento de realizar la mezcla, se debe tomar una parte de esta, y obtener la humedad, con la que se comprueba que el contenido que está dentro del cilindro sí contempla la humedad óptima de la mezcla suelo-cemento. A

la hora de moldear, se debe colocar separadores de papel, que se colocan entre el suelo y el fondo del molde y entre el suelo y las pesas. Ya confeccionado el moldeo, se separa el espaciador del molde para pesar el cilindro y finalizado el procedimiento, estos tres cilindros se sumergen en agua por un periodo de noventa y seis horas. Se debe tomar una lectura del hinchamiento del material o consolidación del material cada veinticuatro horas. Al terminar este periodo se sacan del agua, se dejan escurriendo por quince minutos, y luego se fallan. En la figura 11 y 12, se muestran los cilindros ya confeccionados y sumergidos en agua.



Figura 11. Moldes de CBR moldeados.



Figura 12. Moldes de CBR sumergidos.

Estos resultados generan al final un índice de medición en carreteras en términos de CBR, a un porcentaje de compactación estimado. Normalmente es al 95% o 98%, dependiendo de la importancia que trasmite la vía o el criterio de selección.

La última prueba realizada es la de abrasión y para este ensayo se generaron cubos en moldes de 15,2 cm. de ancho por 15,2 cm. de largo y una profundidad de 15,2 cm. No obstante, como se debe llenar y compactar uniformemente por todo el molde, se trabaja con un rotomartillo. Este rotomartillo es marca "Bauer" y el modelo es el 63437. Debido a que la energía de compactación se altera al utilizar otro equipo, ya no se pueden

moldear los cubos bajo los lineamientos de cinco capas por molde y veinticinco golpes por capa. Por lo tanto, se procede a realizar un moldeo de cubos, bajo la premisa que es una iteración, la cual se basa en ir variando la velocidad del rotomartillo, el tiempo que se aplica por capa y las capas de este mismo, determinando así cuál combinación se llega a obtener al menos un 95% de la densidad seca. Obteniendo la combinación sobre el rotomartillo, se procede al llenado del molde, con la mezcla suelo-cemento; que se aplica el mismo procedimiento sobre los moldes cilindros, únicamente variando el equipo.

El curado de los moldes se aplica igual, y luego de que pasan los siete días, se ingresan al horno los cubos bajo una temperatura de 60°C. Esto para obtener una masa constante y que no altere los datos, luego de realizado el ensayo.



Figura 13. Cubos de mezcla suelo-cemento y Máquina de los Ángeles.

Elaborado los cubos de suelo-cemento y ya tomada la masa constante, se ingresan a la Máquina de los Ángeles. En la figura 13, se puede ver cómo quedan los cubos de suelo-cemento ya desmoldados y también la Máquina de los Ángeles donde se fallaron. El cubo de la mezcla suelo-cemento gira en el interior de la máquina de los Ángeles, por 200 revoluciones sin las esferas de acero, lo cual es indicado por la metodología del ISCYC. Esto es una variación de la norma ASTM C131/131M-14, pues las revoluciones son de quinientos en esa norma, y también, el no colocar las esferas de acero. Ya finalizado las doscientas revoluciones, el suelo se tamiza por la malla #12 (abertura de 1,70 mm.), y el suelo retenido en el tamiz # 12 se pesa, con ello se compara con el peso inicial del cubo antes de ingresar a la máquina, para determinar un porcentaje de desgaste.

Terminada la prueba de desgaste, se concluye todos los ensayos del proyecto, para luego realizar previos cálculos y tomar las conclusiones del proyecto. En la tabla 6, se indica

la cantidad de moldes que se realizaron por etapa de diseño y los ensayos elaborados para cada zona. Se tomará el número global, quiere decir que están involucrados todos los moldes de cada porcentaje, recordando que se evaluaron cuatro porcentajes: 1%, 3%, 5% y 7%; y en los cuales están involucrados tres zonas del país. Y los moldes mencionados son los que se prepararon en moldes cilíndricos de 10,16 cm. (4 in) o los moldes cúbicos de 15,2 cm. de ancho por 15,2 cm. de largo.

Gráfico 1. Diagrama de flujo de la metodología.

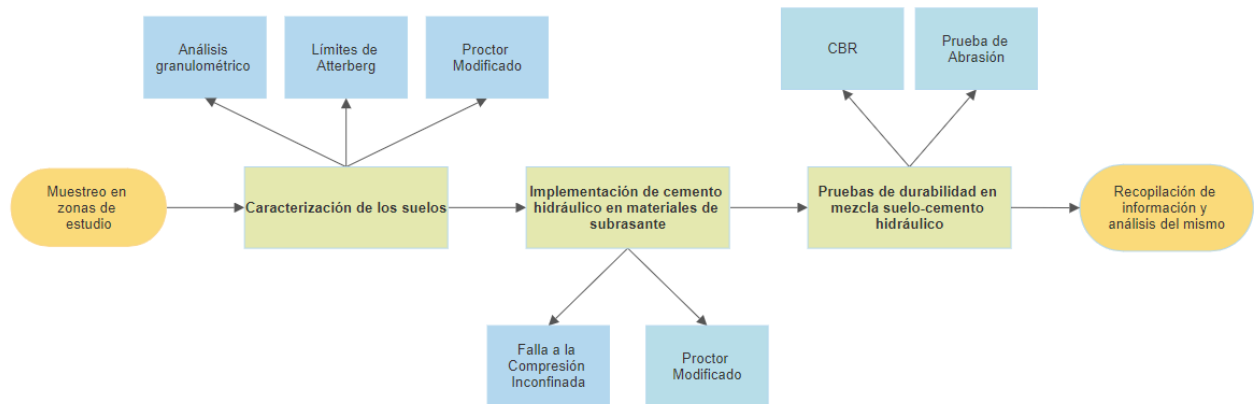


Tabla 6. Ensayos elaborados junto con la cantidad de moldes realizados						
Ensayo	Zonas					
	Los Santos		Nicoya		Chiles	
	Cantidad de moldes realizados	Cantidad de prueba	Cantidad de moldes realizados	Cantidad de prueba	Cantidad de moldes realizados	Cantidad de prueba
Granulometría	-	1	-	1	-	1
Hidrómetro	-	1	-	1	-	1
Gravedad específica	-	1	-	1	-	1
Límites de Atterberg	-	1	-	1	-	1
Proctor Modificado	6	1	5	1	4	1
Proctor modificado con implementación de cemento Hidráulico	18	4	14	4	13	4
Falla por Compresión inconfinada	15	5	15	5	15	5
CBR	6	1	6	1	3	1
Desgaste por abrasión	2	1	2	1	2	1
Sumatoria de moldes por zona	47		42		37	
Sumatoria de moldes en total						126

Resultados

Dicho capítulo se manejará por etapas para ir expresando los resultados de una manera organizada y cronológica. Los ensayos al ser los mismos para tres suelos, se repiten tablas para poder obtener el resultado final, no obstante, se mostrarán en los gráficos recomendados la unión de los tres suelos.

Caracterización de los suelos (Etapa 1)

Para esta etapa cabe destacar que los suelos fueron obtenidos en su estado natural en caminos donde transitan vehículos. De ellos, se eliminó la parte vegetal en los puntos donde se necesitaba obtener la muestra, para que fuera únicamente el suelo de subrasante.

Para el suelo de la zona de Pocosol, este contaba con la presencia de dos tipos de suelo. En la zona en algunos puntos del camino, los primeros 20 cm. a 30 cm. pertenecían al suelo rojizo presentado en la figura 4, y luego se encontró un suelo gris. Por ende, en este ámbito de caracterización de los suelos, las tablas de resultados y los gráficos se enfocan al suelo gris de la zona de Pocosol, ya que este no contaba con una caracterización previa.

El suelo rojizo fue caracterizado previamente por los laboratorios de CACISA (Compañía Asesora en Construcción e Ingeniería S.A.). En el anexo 1, se muestra los datos brindados del informe, presentado por dicho laboratorio. La caracterización de las 3 zonas de estudio se puede expresar en los resultados a continuación.

Tabla 7. Preparación de material granular de la zona de Los Santos para previo análisis granulométrico							
Muestra Inicial	Peso envase (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)	%w
	112,61	471,21	390,27	390,39	0,03	390,33	29,12
Muestra Lavada	Peso envase (g)	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)		
	112,61	275,68	275,75	0,03	275,72		

Tabla 8. Análisis granulométrico del material granular de la zona de *Los Santos*

Abertura (mm)	Tamiz	Peso envase (g)	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasando (%)
4,76	#4	-		0,00	0,00	100,00
2,00	#10	65,46	82,22	14,71	14,71	85,29
0,84	#20	64,49	93,18	16,67	31,38	68,62
0,42	#40	66,50	92,25	16,51	47,89	52,11
0,15	#100	68,01	117,69	21,06	68,94	31,06
0,07	#200	66,88	105,03	18,79	87,74	12,26
-	Charola	65,15	68,54	12,26	100,00	0
	Sumatoria	396,49	558,91	100		

Tabla 9. Preparación de material granular de la zona de *Nicoya* para previo análisis granulométrico

<i>Muestra Inicial</i>	Peso envase (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)	%w
	67,55	460,75	396,74	396,85	0,03	396,80	19,42
<i>Muestra Lavada</i>	Peso envase (g)	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)		
	67,55	141,73	141,76	0,02	141,75		

Tabla 10. Análisis granulométrico del material granular de la zona de *Nicoya*

Abertura (mm)	Tamiz	Peso envase (g)	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasando (%)
4,76	#4	-	0,00	0,00	0,00	100,00
2,00	#10	111,65	119,52	17,27	17,27	82,73
0,84	#20	109,43	120,71	17,44	34,71	65,29
0,42	#40	106,23	115,33	16,67	51,38	48,62
0,15	#100	111,06	128,90	18,63	70,01	29,99
0,07	#200	112,88	139,89	20,21	90,22	9,78
-	Charola	66,28	67,67	9,78	100,00	0,00
	Sumatoria	617,53	692,02	100		

Tabla 11. Preparación de material granular de la zona de <i>Pocosol (Gris)</i> para previo análisis granulométrico							
Muestra Inicial	Peso envase (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)	%w
	65,15	421,35	342,1	341,95	0,04	342,03	28,65
Muestra Lavada	Peso envase (g)	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)		
	103,22	213,88	213,93	0,02	213,91		

Tabla 12. Análisis granulométrico del material granular de la zona de <i>Pocosol (Gris)</i>						
Abertura (mm)	Tamiz	Peso envase (g)	Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasando (%)
4,76	#4	-	0,00	0,00	0,00	100,00
2,00	#10	68,11	69,42	11,80	11,80	88,20
0,84	#20	65,13	68,91	11,71	23,51	76,49
0,42	#40	103,03	110,67	18,81	42,33	57,67
0,15	#100	112,30	143,74	24,43	66,76	33,24
0,07	#200	64,65	116,25	19,76	86,52	13,48
-	Charola	64,37	79,30	13,48	100,00	0,00
	Sumatoria	477,59	588,29	100		

La tabla 13, corresponde al error que el análisis granulométrico puede tener en su totalidad. Este se toma con el peso de la muestra al inicio (antes de ser lavada), el peso de la muestra ya lavada y con el peso retenido total de todos los tamices luego de efectuado el ensayo (contando la

charola). A estos se resta el peso retenido de los tamices y la masa lavada y este se divide entre la masa inicial. Esto para no tener pérdida de material mientras se ejecuta el ensayo, este porcentaje no puede ser mayor al 1%.

Tabla 13. Comprobación de error en Análisis Granulométrico para las tres zonas			
Los Santos	Masa Lavada (g)	Peso Retenido Total (g)	Masa Inicial (g)
	163,11	162,42	277,72
	Porcentaje de error en granulometría (%)		
	0,247		
Nicoya	Masa Lavada (g)	Peso Retenido Total (g)	Masa Inicial (g)
	74,20	74,49	329,25
	Porcentaje de error en granulometría (%)		
	0,090		

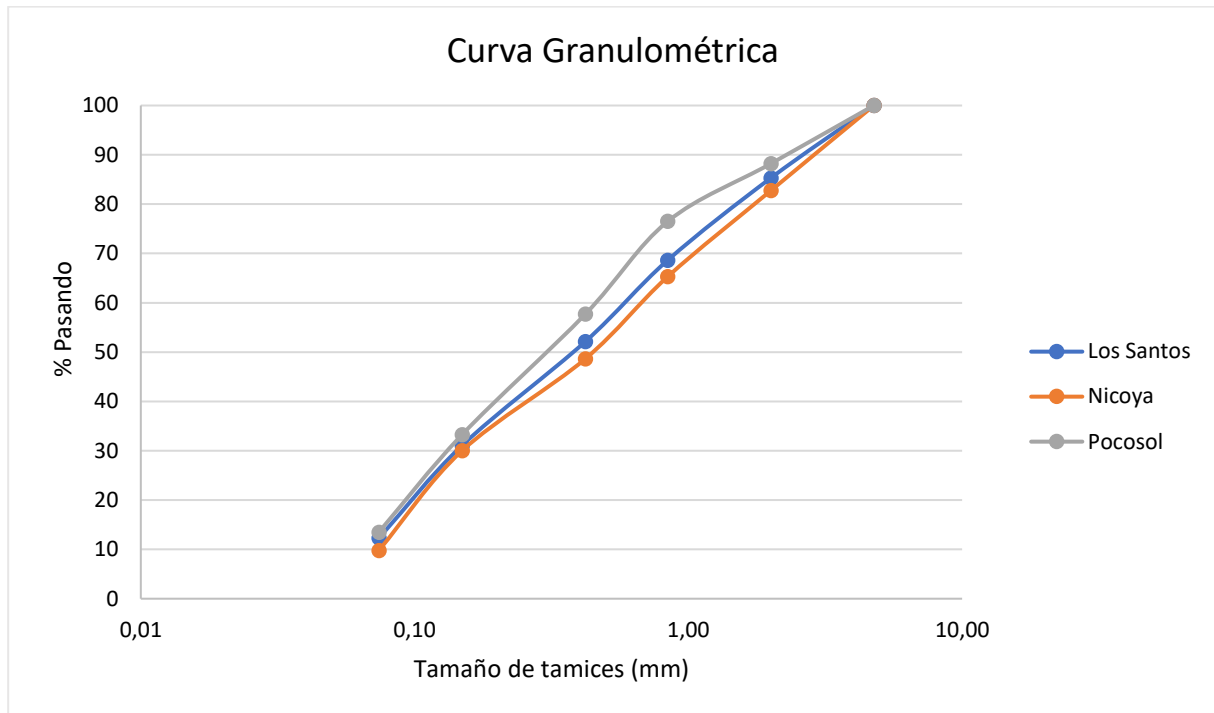
	Masa Lavada (g)	Peso Retenido Total (g)	Masa Inicial (g)
Pocosol (Gris)	110,69	110,7	276,88
	Porcentaje de error en granulometría (%)		
	0,005		

Para finalizar la granulometría, la tabla 14 indica el porcentaje del suelo pasando por el tamiz #200, en él se debe considerar el material que fue lavado por el tamiz #200 y el peso del material retenido en la charola. De estos se restan con la muestra

inicial y se dividen por esta misma para obtener que el porcentaje pasando por el tamiz #200 es muy alto en los tres suelos. Se considera que hay una gran cantidad de limos y arcillas en las muestras de subrasante.

Tabla 14. Porcentaje pasando el tamiz #200 para las tres zonas			
Los Santos	Masa Lavada (g)	Peso Retenido Charola (g)	Masa Inicial (g)
	163,11	3,39	277,72
	Porcentaje pasando #200 (%)		
	42,491		
Nicoya	Masa Lavada (g)	Peso Retenido Charola (g)	Masa Inicial (g)
	74,20	1,39	329,25
	Porcentaje pasando #200 (%)		
	77,887		
Pocosol (Gris)	Masa Lavada (g)	Peso Retenido Charola (g)	Masa Inicial (g)
	110,69	14,93	276,88
	Porcentaje pasando #200 (%)		
	65,416		

Gráfico 2. Curva Granulométrica para las tres zonas.



Las tablas 15, 16 y 17 expresan la ejecución del ensayo de límites de Atterberg. En esta se logra observar la humedad de los límites plásticos y líquidos y a cuántos golpes cerró la abertura de 10 mm. en la copa de Casagrande en los límites líquidos para las tres zonas.

Los gráficos 3, 4 y 5 nos dan origen a la curva de límites líquidos para la obtención de la ecuación de la curva y con ello obtener el límite líquido a veinticinco golpes exactos. La tabla 18, realiza un resumen de los límites líquidos y plásticos de las tres zonas, con su correspondiente índice de plasticidad.

Límite	Peso envase (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)	%w	N.º golpes
LP_1	15,01	23,21	20,13	20,11	0,10	20,12	60,47	
LP_2	14,12	24,54	20,57	20,55	0,10	20,56	61,80	
LL_1	14,31	29,80	23,66	23,67	0,04	23,67	65,58	29
LL_2	14,30	33,95	26,13	26,12	0,04	26,13	66,17	21
LL_3	14,42	27,43	22,20	22,20	0,00	22,20	67,22	17

Gráfico 3. Curva de Flujo para obtención de límite líquido a 25 golpes en zona de Los Santos.

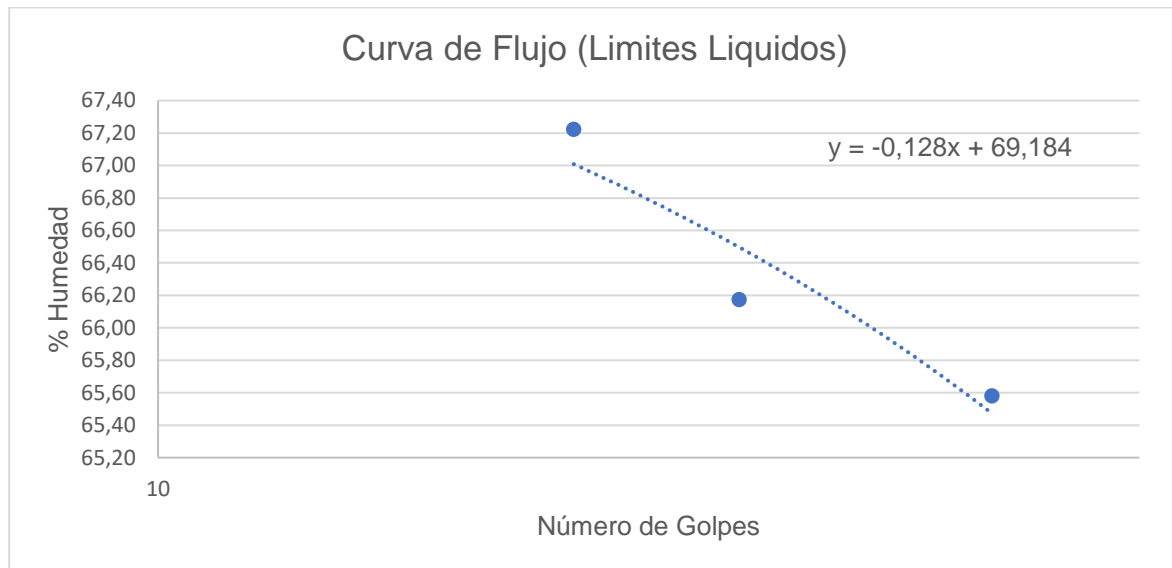


Tabla 16. Elaboración de Límites de Atterberg en la zona de <i>Nicoya</i>								
Límite	Peso envase (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)	%w	N.º golpes
LP_1	14,28	23,26	20,55	20,55	0,00	20,55	43,22	
LP_2	12,03	22,22	19,19	19,19	0,00	19,19	42,32	
LL_1	14,36	31,44	25,53	25,54	0,04	25,54	52,84	29
LL_2	14,37	31,46	25,46	25,48	0,08	25,47	53,96	23
LL_3	14,32	31,69	25,54	25,54	0,00	25,54	54,81	19

Gráfico 4. Curva de Flujo para obtención de límite líquido a 25 golpes en zona de Nicoya.

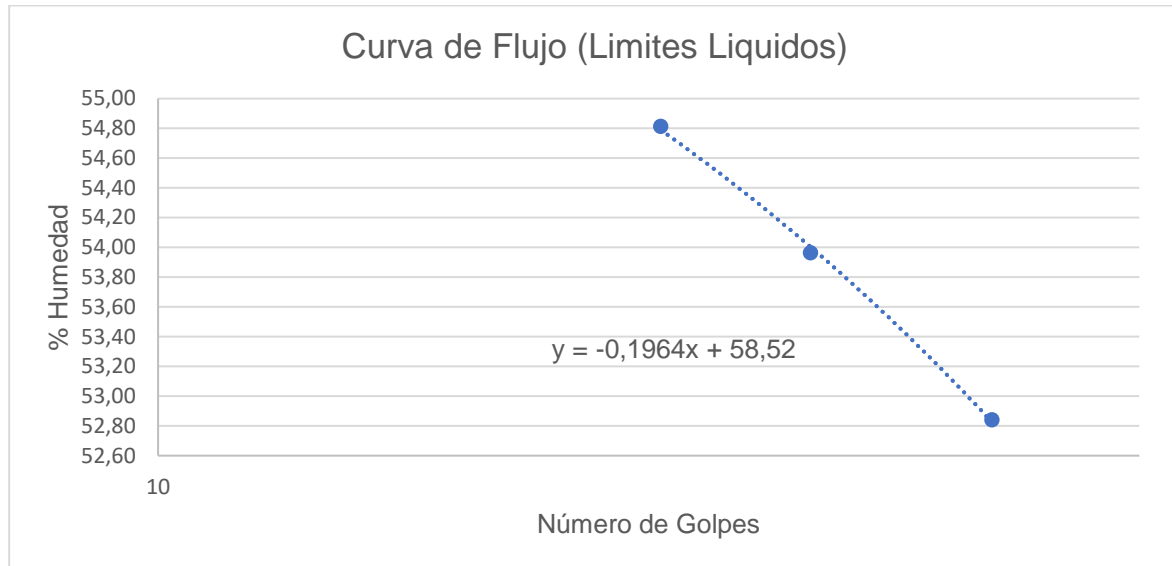


Tabla 17. Elaboración de Límites de Atterberg en la zona de Pocosal (Gris)

Límite	Peso envase (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)	%w	N.º golpes
LP_1	14,37	24,10	19,88	19,86	0,10	19,87	76,91	
LP_2	14,01	23,20	19,26	19,27	0,07	19,26	74,95	
LL_1	14,20	30,62	22,00	22,02	0,09	22,01	110,24	35
LL_2	14,69	27,11	20,35	20,37	0,10	20,36	119,05	21
LL_3	14,02	24,39	18,74	18,75	0,05	18,75	119,47	18

Gráfico 5. Curva de Flujo para obtención de límite líquido a 25 golpes en zona de Pocosal (Gris).

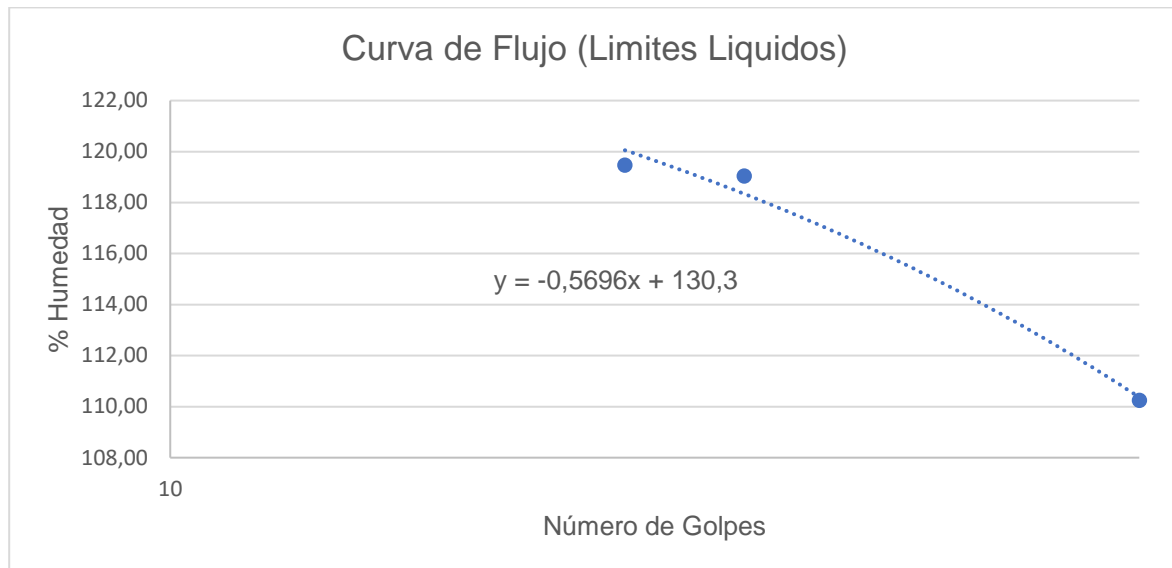


Tabla 18. Calculo de Índice de Plasticidad y Límite Líquido a 25 golpes, para las tres zonas

			Entero más cercano
Los Santos	Límite Líquido a 25 golpes	65,98	66
	Promedio de Límites Plásticos	61,14	61
	Índice de plasticidad		5
Nicoya	Límite Líquido a 25 golpes	53,61	54
	Promedio de Límites Plásticos	42,77	43
	Índice de plasticidad		11
Pocosal (Gris)	Límite Líquido a 25 golpes	116,06	116
	Promedio de Límites Plásticos	75,93	76
	Índice de plasticidad		40

Tabla 19. Datos de entrada para clasificación de suelos según ASTM D3282-15

Suelo	% Pas. #10	% Pas. #40	% Pas. #200	LL	IP
Los Santos	85	52	42	66	5
Nicoya	83	49	78	54	11
Pocosal (Gris)	88	58	65	116	40
Pocosal (Rojizo) *1	98	95	89	72	24

Nota: *1. Los datos de este suelo fueron obtenidos de la caracterización del laboratorio de CACISA.

Tabla 20. Clasificación de Suelos o Mezclas de Suelo-Agregado.

General Classification	Granular Materials 35 % or Less Passing 75 μm (No. 200)							Silt-Clay Materials More Than 35 % Passing 75 μm (No. 200)			
Group Classification	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5, A-7-6
Sieve analysis, % passing:											
2.00 mm (No. 10)	50 max	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
425 μm (No. 40)	30 max	50 max	51 min	...	...	...	...	...	...	...	...
75 μm (No. 200)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Characteristics of fraction passing 425 μm (No. 40):											
Liquid Limit	...		...	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Plasticity Index	6 max		N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min ^A
Usual types of significant constituent materials	Stone Fragments, Gravel and Sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand				Silty Soils		Clayey Soils	
General rating as subgrade	Excellent to Good							Fair to Poor			

Fuente: ASTM D3282-15

Los suelos ya clasificados llevan consigo un índice de grupo, el cual es calculado con la formula siguiente. Esta fórmula se obtiene de la norma ASTM D3282-15.

$$IG = (F - 35)[0,2 + 0,005(LL - 40)] + [0,01(F - 15)(PI - 10)] \quad \text{(Ecuación 1)}$$

- IG = Índice de Grupo
- F = Porcentaje pasando el tamiz #200
- LL = Límite líquido
- PI = Índice de Plasticidad

Tabla 21. Clasificación de materiales según norma ASTM D3282-15	
Los Santos	A-5 (1)
Nicoya	A-7-5 (12)
Pocosol (Gris)	A-7-6 (34)
Pocosol (Rojizo)	A-7-6 (30)

Con ello, se termina el apartado de clasificación de los suelos. Empero, se colocará en esta misma etapa, los resultados de la prueba de Proctor Modificado, porque de la misma manera este arroja resultados importantes para el ámbito de propiedades mecánicas. Cabe recordar que el método utilizado para este ensayo fue el "A". Y se aplicó el mismo trato con el suelo de Pocosol, ya que al rojizo si se le aplicó el Proctor Modificado.

Las tablas 22, 23 y 24 mencionan los puntos obtenidos de cada Proctor en su respectiva zona. En estos puntos de Proctor se muestra la

densidad seca y su correspondiente humedad, como se observa en los gráficos 6, 7 y 8 que muestran la curva de compactación de las tres zonas, en los cuales, según la distribución de los puntos, se procede a obtener una curva, para con ello, conseguir el contenido de humedad óptima y densidad seca óptima, el cual se señala por medio de flechas.

Tabla 22. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de <i>Los Santos</i>						
Punto	% agua	ml agua	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)
1	4	120	5762,1	36,78	1670,80	1221,51
2	8	240	5840,5	40,97	1757,14	1246,45
3	10	300	5792,8	45,02	1704,61	1175,42
4	12	360	5766,5	47,62	1675,64	1135,11
5	14	420	5744,4	50,42	1651,31	1097,78

Gráfico 6. Curva de Compactación para zona de *Los Santos*.

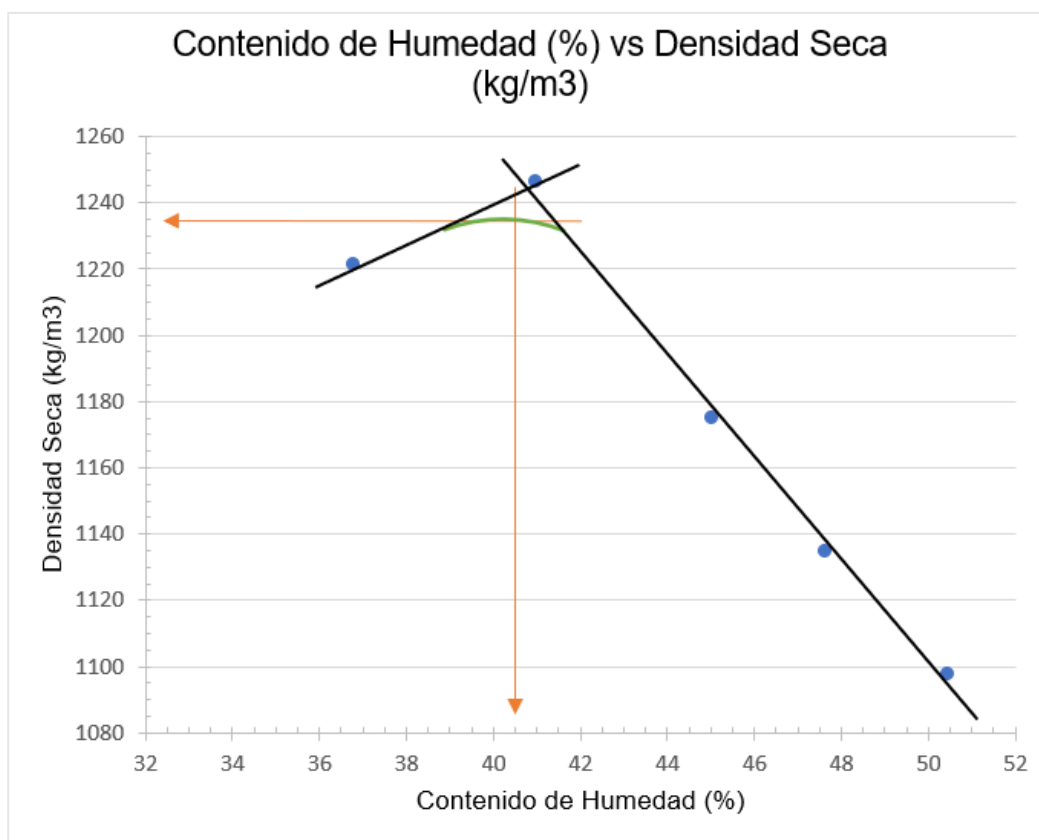


Tabla 23. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de <i>Nicoya</i>						
Punto	% agua	ml agua	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)
1	6	142,62	5868,6	17,54	1788,08	1521,29
2	10	237,7	6026,7	20,30	1962,19	1631,02
3	14	332,78	5996,8	24,06	1929,26	1555,15
4	16	380,32	5984,4	28,97	1915,60	1485,32

Gráfico 7. Curva de Compactación para zona de *Nicoya*.

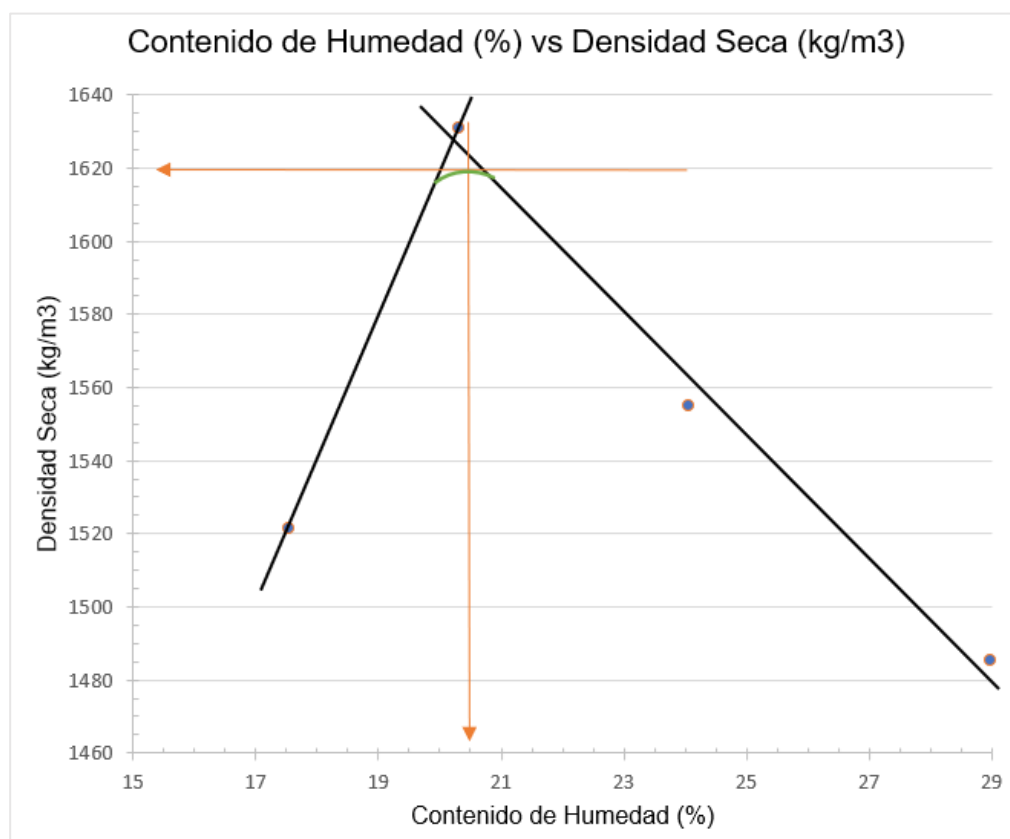
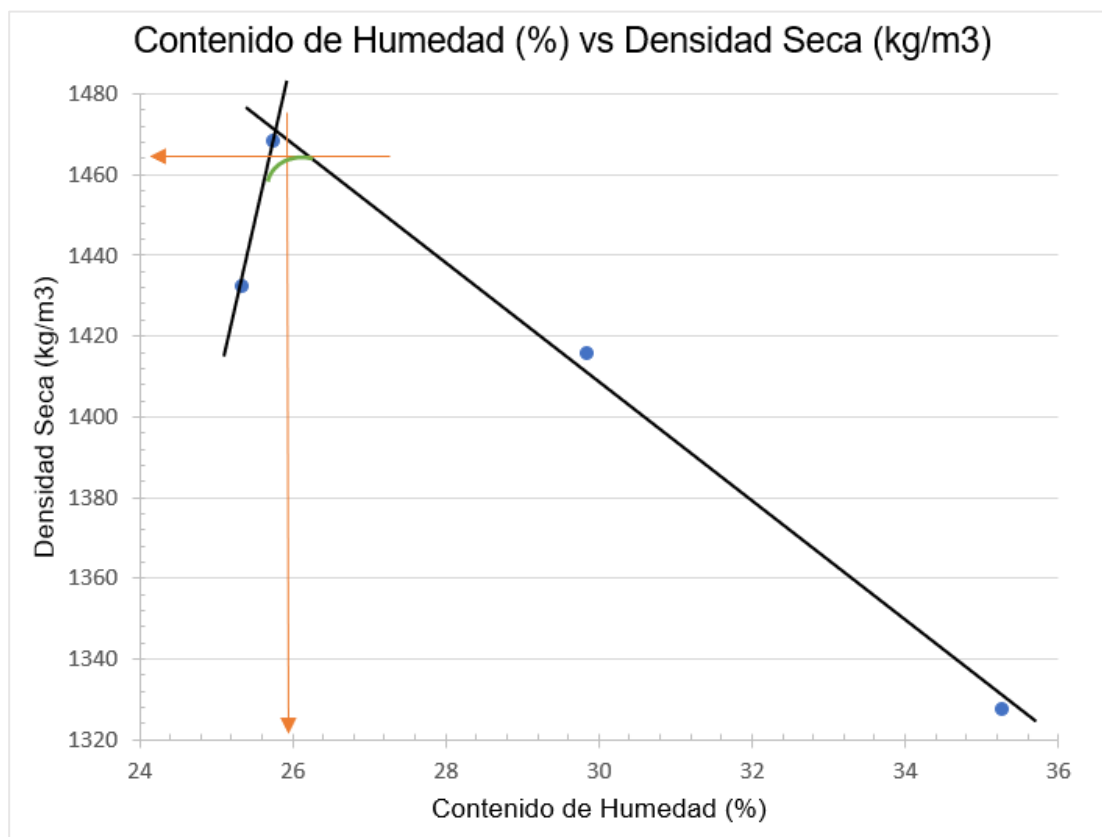


Tabla 24. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de <i>Pocosol (Gris)</i>						
Punto	% agua	ml Agua	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)
1	2	60,04	5929	25,33	1795,05	1432,28
2	4	120,08	5977,3	25,75	1846,63	1468,54
3	6	180,12	5969,7	29,85	1838,51	1415,89
4	10	300,2	5929,7	35,26	1795,80	1327,67

Gráfico 8. Curva de Compactación para zona de *Pocosol (Gris)*.



La tabla 25 resume los contenidos de humedad y densidad seca óptimos para las tres zonas. De igual manera se coloca el suelo rojizo, porque se obtiene el dato de la caracterización previa.

Tabla 25. Resumen de Contenidos de Humedad y Densidades Secas Óptimas de las tres zonas		
Suelo	Contenido de Humedad Óptimo (%)	Densidad Seca Óptima (kg/m ³)
Los Santos	40,50	1235
Nicoya	20,50	1620
Pocosol (Gris)	26	1464
Pocosol (Rojizo)	30,5	1348

Implementación de cemento hidráulico en materiales de subrasante (Etapa 2)

En los resultados que se brindarán a continuación, la implementación se realiza en las tres zonas, pero en el caso de la zona de Pocosol, solo se aplicará al suelo rojizo. En el análisis de resultados se explicará por qué se toma esta decisión de utilizar solo un suelo de la zona. Por lo tanto, cuando se refiere a Pocosol, se habla del suelo rojizo. En esta sección se utilizarán cuatro porcentajes de cemento como se especifica en apartados anteriores. Para esta etapa lo que se

quiere de los porcentajes de cemento hidráulico es ver su comportamiento en el desempeño del aumento de las propiedades mecánicas y obtener una mezcla óptima de las tres zonas para aplicar pruebas de durabilidad. En las tablas 26, 31 y 36 se puede observar la corrección de agua por humedad de las tres zonas. En ella varía el contenido de humedad óptimo, ya obtenido y visualizado en la tabla 25.

Tabla 26. Corrección de agua para el material granular en la zona de Los Santos en prueba Proctor Modificado con implementación de cemento hidráulico						
Peso envase (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)	%w
64,63	625,45	468,31	468,46	0,03	468,39	38,90
Contenido de Humedad Óptima (%)		40,50%	Densidad seca Óptima (kg/m ³)		1235	
Peso suelo Húmedo (g)	Humedad del suelo (%)	Peso del suelo Seco (g)	Cantidad de agua (ml)	Peso suelo con Humedad Opt. (g)	Cantidad de agua (ml)	Cantidad por agregar de agua (ml)
3000,00	38,90	2159,81	840,19	3034,53	874,72	34,53

Tabla 27. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de <i>Los Santos</i> con 1% de cemento hidráulico							
Porcentaje de cemento			1%	Cantidad de cemento (g)			21,60
Punto	Relación A/C	Cantidad de agua en A/C (ml)	Cantidad de agua en mezcla (ml)	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)
1	0,9	19,44	53,97	5826	39,19	1714,61	1231,81
2	0,3	6,48	41,01	5840,8	38,21	1730,51	1252,12
3	0	0,00	34,53	5833,4	37,77	1722,56	1250,29

Tabla 28. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de <i>Los Santos</i> con 3% de cemento hidráulico							
Porcentaje de cemento			3%	Cantidad de cemento (g)			64,79
Punto	Relación A/C	Cantidad de agua en A/C (ml)	Cantidad de agua en mezcla (ml)	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)
1	0,25	16,20	50,73	5833,4	1,72	1722,56	1257,34
2	0,5	32,40	66,93	5845,7	1,74	1735,77	1261,35
3	0,75	48,60	83,13	5847,6	1,74	1737,81	1249,30
4	1	64,79	99,33	5845,6	1,74	1735,66	1244,01

Tabla 29. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de <i>Los Santos</i> con 5% de cemento hidráulico							
Porcentaje de cemento			5%	Cantidad de cemento (g)			107,99
Punto	Relación A/C	Cantidad de agua en A/C (ml)	Cantidad de agua en mezcla (ml)	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)
1	0,5	54,00	88,53	5851,9	38,90	1742,43	1254,44
2	0,25	27,00	61,53	5827,7	37,80	1716,43	1245,59
3	0,75	80,99	115,53	5845,9	40,88	1735,98	1232,28

Tabla 30. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de <i>Los Santos</i> con 7% de cemento hidráulico							
Porcentaje de cemento			7%	Cantidad de cemento (g)			151,19
Punto	Relación A/C	Cantidad de agua en A/C (ml)	Cantidad de agua en mezcla (ml)	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)
1	0,25	37,80	72,33	5832,5	39,90	1721,59	1230,62
2	0,5	75,59	110,13	5842,9	39,12	1732,76	1245,56
3	0,75	113,39	147,92	5863,2	37,41	1754,57	1276,92
4	1	151,19	185,72	5853,4	40,64	1744,04	1240,10

Gráfico 9. Puntos de Proctor Modificado en la zona de *Los Santos* con las implementaciones de cemento hidráulico.

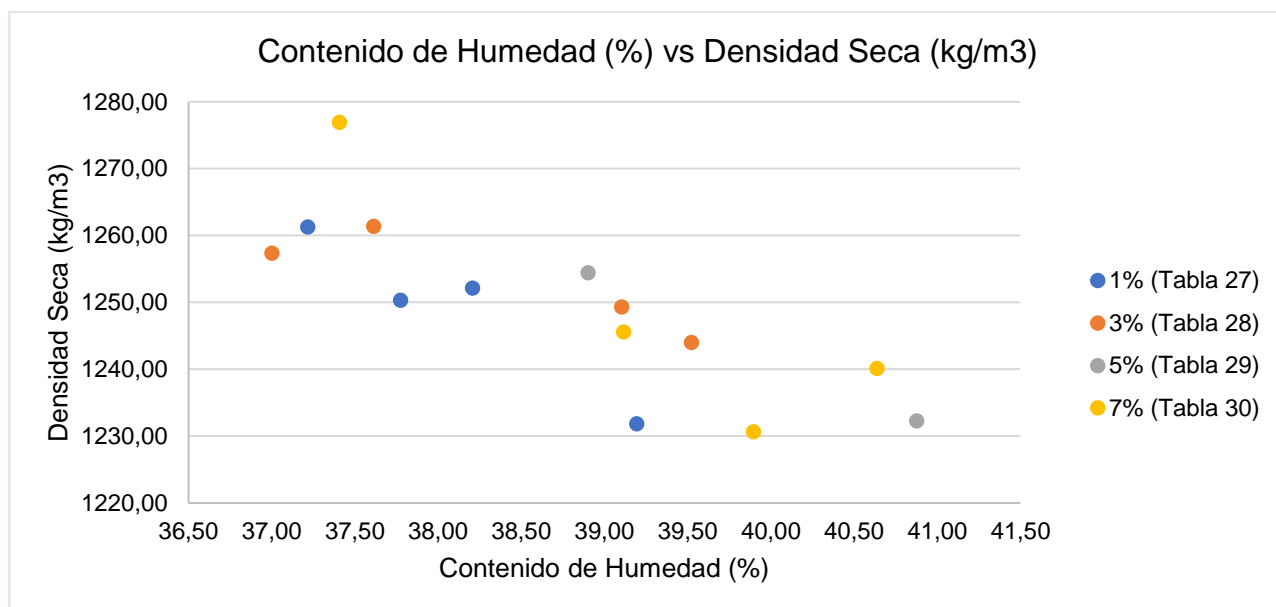


Gráfico 10. Curvas de compactación en relación del A/C para la zona de Los Santos con las implementaciones de cemento hidráulico.

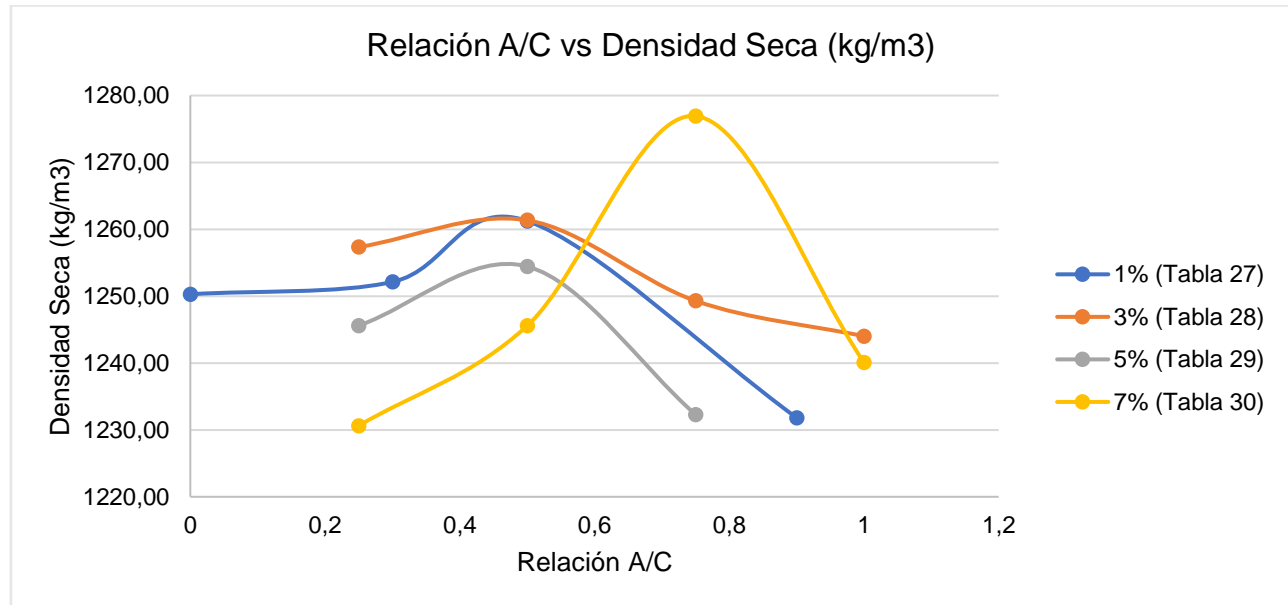


Tabla 31. Corrección de agua para el material granular en la zona de Nicoya en prueba Proctor Modificado con implementación de cemento hidráulico

Peso envase (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)	%w
66,39	517,42	462,89	462,47	0,09	462,68	13,81
Contenido de Humedad Óptima (%)		20,50%		Densidad seca Óptima (kg/m³)		1620
Peso suelo Húmedo (g)	Humedad del suelo (%)	Peso del suelo Seco (g)	Cantidad de agua (ml)	Peso suelo con Humedad Opt. (g)	Cantidad de agua (ml)	Cantidad por agregar de agua (ml)
3000,00	13,81	2635,90	364,10	3176,26	540,36	176,26

Tabla 32. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de <i>Nicoya</i> con 1% de cemento hidráulico							
Porcentaje de cemento			1%	Cantidad de cemento (g)			26,36
Punto	Relación A/C	Cantidad de agua en A/C (ml)	Cantidad de agua en mezcla (ml)	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)
1	0,5	9,19	132,08	5992	21,66	1923,97	1581,41
2	0	0,00	122,89	5984,2	20,84	1915,38	1584,99
3	0,9	16,54	139,43	5962,7	22,14	1891,71	1548,75

Tabla 33. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de <i>Nicoya</i> con 3% de cemento hidráulico							
Porcentaje de cemento			3%	Cantidad de cemento (g)			79,08
Punto	Relación A/C	Cantidad de agua en A/C (ml)	Cantidad de agua en mezcla (ml)	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)
1	0,5	39,54	215,80	5975,2	22,24	1905,47	1558,80
2	0,75	59,31	235,57	6029,4	22,36	1965,16	1606,10
3	0,95	75,12	251,38	6015,4	22,70	1949,74	1589,04

Tabla 34. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de <i>Nicoya</i> con 5% de cemento hidráulico							
Porcentaje de cemento			5%	Cantidad de cemento (g)			131,80
Punto	Relación A/C	Cantidad de agua en A/C (ml)	Cantidad de agua en mezcla (ml)	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)
1	0,5	65,90	242,16	6009,2	20,61	1942,92	1610,92
2	0,95	125,21	301,46	6045,2	22,44	1982,56	1619,16
3	1,1	144,97	321,23	6018,6	23,32	1953,27	1583,89

Tabla 35. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de <i>Nicoya</i> con 7% de cemento hidráulico							
Porcentaje de cemento			7%	Cantidad de cemento (g)			184,51
Punto	Relación A/C	Cantidad de agua en A/C (ml)	Cantidad de agua en mezcla (ml)	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)
1	0,5	92,26	268,52	6002,1	20,90	1935,10	1600,53
2	0,75	138,38	314,64	6036,5	22,43	1972,98	1611,55
3	1	184,51	360,77	6052,4	23,68	1990,49	1609,34

Gráfico 11. Puntos de Proctor Modificado en la zona de *Nicoya* con las implementaciones de cemento hidráulico.

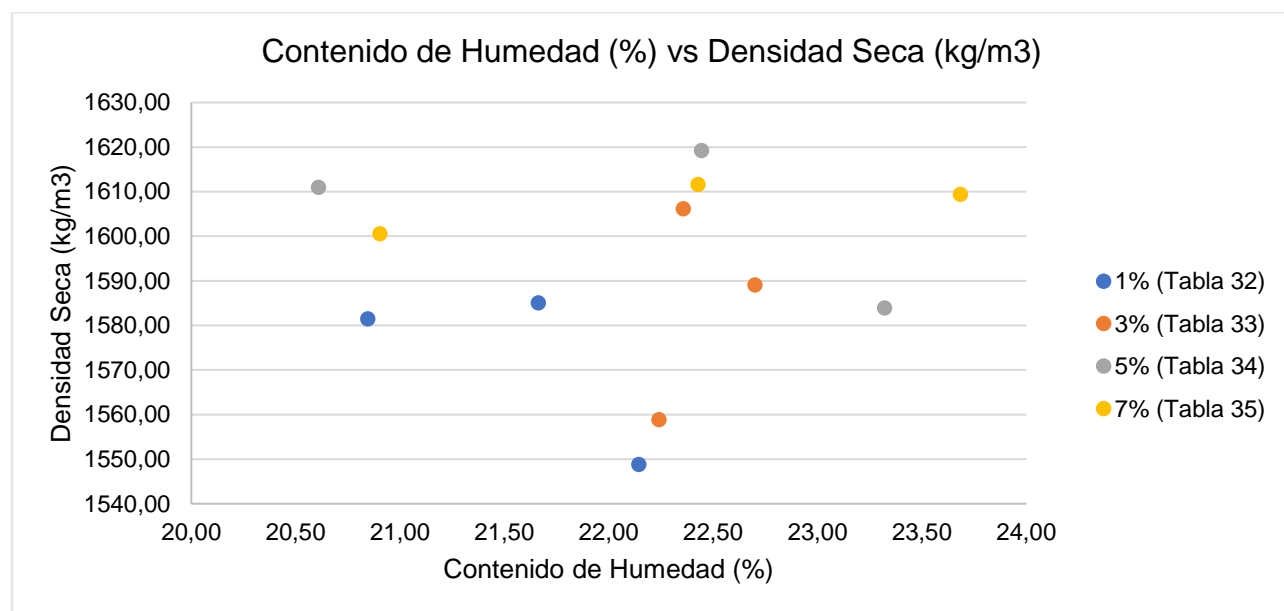


Gráfico 12. Curvas de compactación en relación del A/C para la zona de Nicoya con las implementaciones de cemento hidráulico.

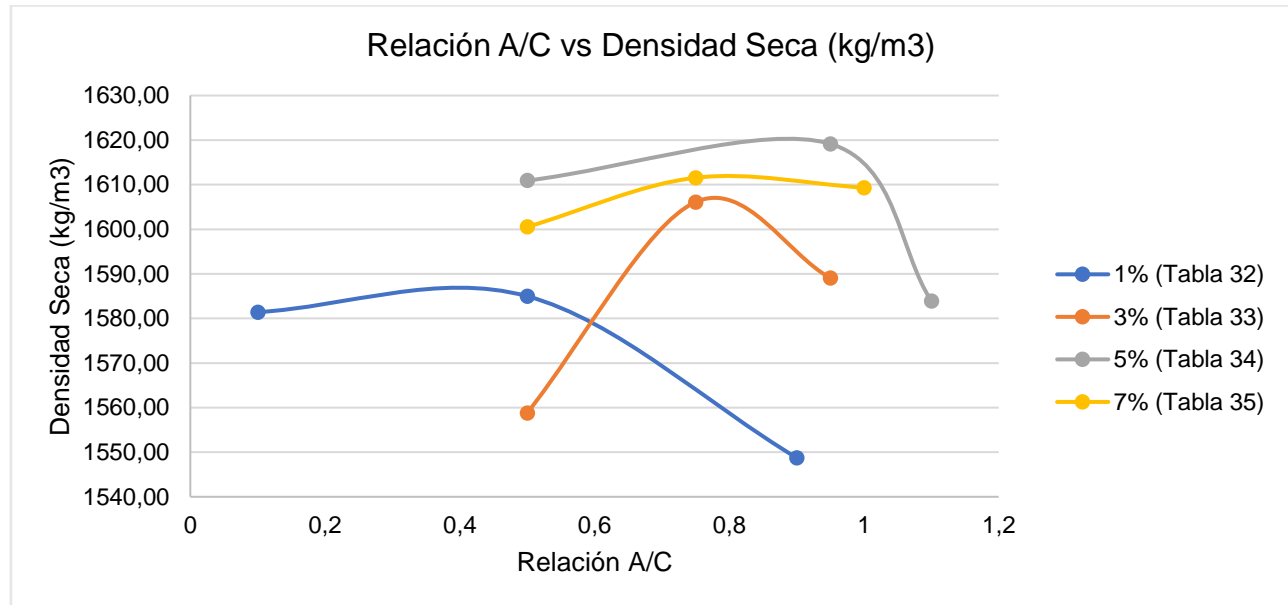


Tabla 36. Corrección de agua para el material granular en la zona de Pocosal en prueba Proctor Modificado con implementación de cemento hidráulico

Peso envase (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)	%w
65,14	900,00	805,70	805,80	0,01	805,75	12,73
Contenido de Humedad Óptima (%)		30,50%		Densidad seca Óptima (kg/m ³)		1348
Peso suelo Húmedo (g)	Humedad del suelo (%)	Peso del suelo Seco (g)	Cantidad de agua (ml)	Peso suelo con Humedad Opt. (g)	Cantidad de agua (ml)	Cantidad por agregar de agua (ml)
3000,00	12,73	2661,32	338,68	3473,02	811,70	473,02

Tabla 37. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de *Pocosol* con 1% de cemento hidráulico

Porcentaje de cemento			1%	Cantidad de cemento (g)			26,61
Punto	Relación A/C	Cantidad de agua en A/C (ml)	Cantidad de agua en mezcla (ml)	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m³)	Densidad seca (kg/m³)
1	0,5	13,31	486,33	5982	33,37	1882,17	1411,25
2	0,9	23,95	496,98	5953,8	33,25	1851,88	1389,80
3	0,1	2,66	475,68	5951,1	32,58	1848,98	1394,66

Tabla 38. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de *Pocosol* con 3% de cemento hidráulico

Porcentaje de cemento			3%	Cantidad de cemento (g)			79,84
Punto	Relación A/C	Cantidad de agua en A/C (ml)	Cantidad de agua en mezcla (ml)	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m³)	Densidad seca (kg/m³)
1	0,5	39,92	512,94	5976,3	32,69	1876,05	1413,81
2	0,75	59,88	532,90	5980,5	33,84	1880,56	1405,06
3	1	79,84	552,86	5965,1	35,52	1864,02	1375,48

Tabla 39. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de *Pocosol* con 5% de cemento hidráulico

Porcentaje de cemento			5%	Cantidad de cemento (g)			133,07
Punto	Relación A/C	Cantidad de agua en A/C (ml)	Cantidad de agua en mezcla (ml)	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m³)	Densidad seca (kg/m³)
1	0,5	66,53	539,56	5994,2	33,08	1895,27	1424,14
2	0,75	99,80	572,82	5990,3	34,21	1891,09	1409,03
3	0,25	33,27	506,29	6002,4	32,53	1904,08	1436,74

Tabla 40. Elaboración de prueba Proctor Modificado en la zona de *Pocosol* con 7% de cemento hidráulico

Porcentaje de cemento			7%	Cantidad de cemento (g)			186,29
Punto	Relación A/C	Cantidad de agua en A/C (ml)	Cantidad de agua en mezcla (ml)	Peso Proctor (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)
1	0,5	93,15	566,17	6004,9	30,86	1906,77	1457,08
2	0,25	46,57	519,60	6014	29,42	1916,54	1480,89
3	0	0,00	473,02	6012	28,56	1914,39	1489,08

Gráfico 13. Puntos de Proctor Modificado en la zona de *Pocosol* con las implementaciones de cemento hidráulico.

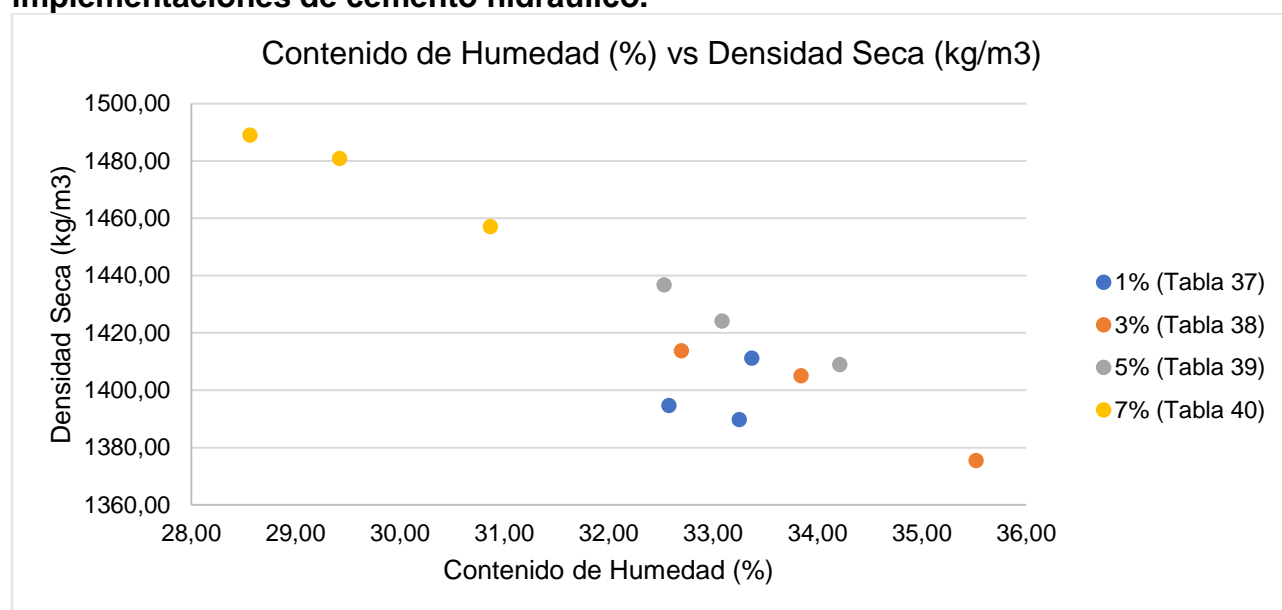
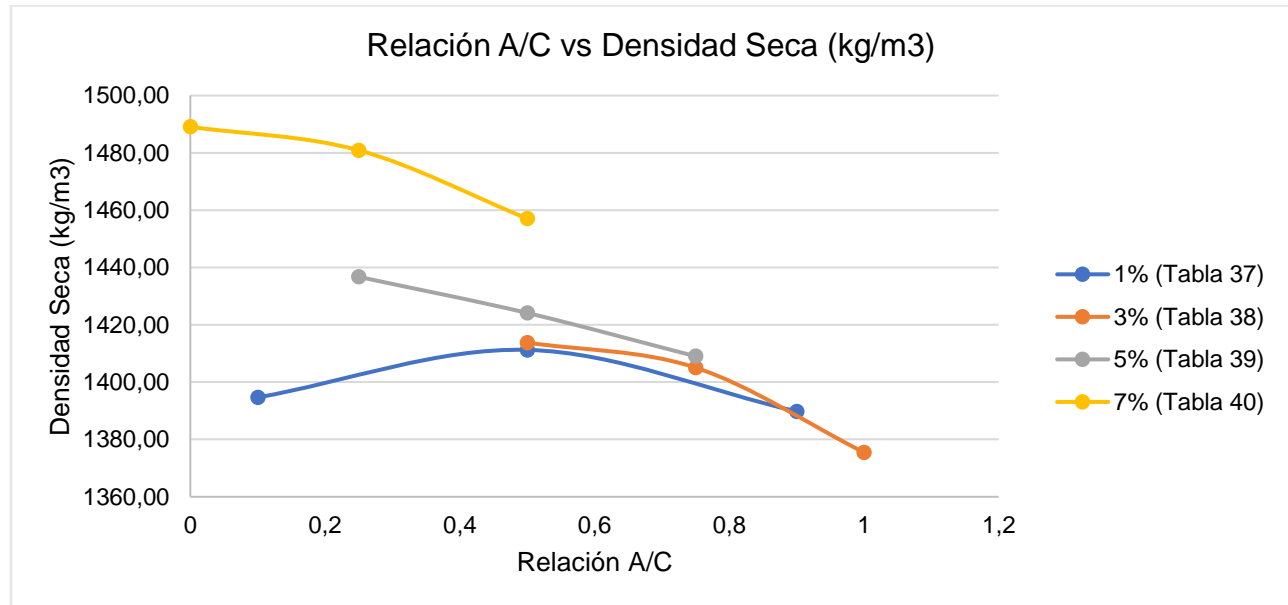


Gráfico 14. Curvas de compactación en relación del A/C para la zona de Pocosol con las implementaciones de cemento hidráulico.



Para las pruebas por falla a compresión inconfiada, se toma la relación de A/C óptima en cada porcentaje de los tres suelos. De la mezcla suelo-cemento, se moldean tres cilindros de 10,16 cm. (4 in) de diámetro para promediar los 3 y obtener el resultado del f'c.

Se toman datos previos como las mediciones del volumen de los cilindros u observaciones que sucedan para cada molde o en general, en el se aprecia el día en el cual fue

realizado, el día donde fue desmoldado y por el último el día de falla.

Para este proceso, se realiza un ajuste por humedad, al igual como se desarrolló en la prueba pasada, sin embargo, no se mostrará la tabla ya que podría ser redundante, puesto que el procedimiento es el mismo, lo único que varía es la humedad en sitio porque esta depende de la temperatura ambiente en que se encuentre al momento, este perderá o aumentará la humedad del material granular.

Tabla 41. Datos de la zona de Los Santos sobre falla a la compresión inconfiada de especímenes a siete días

Aplicación de Cemento	Moldes	Área (cm ²)	Carga Aplicada (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm ²)	Promedio Esfuerzo (kg/cm ²)
0%	1	80,31	27,38	0,34	0,37
	2	80,67	30,10	0,37	
	3	80,55	31,17	0,39	
1%	1	80,31	47,37	0,59	0,63
	2	80,69	51,59	0,64	
	3	80,67	53,24	0,66	

3%	1	80,61	109,06	1,35	1,42
	2	80,67	117,87	1,46	
	3	80,31	115,67	1,44	
5%	1	80,55	159,36	1,98	2,01
	2	80,31	159,73	1,99	
	3	80,69	165,24	2,05	
7%	1	80,55	227,66	2,83	2,73
	2	80,61	212,98	2,64	
	3	80,67	218,48	2,71	

Gráfico 15. Esfuerzo por compresión inconfiada en la zona de *Los Santos* a siete días.

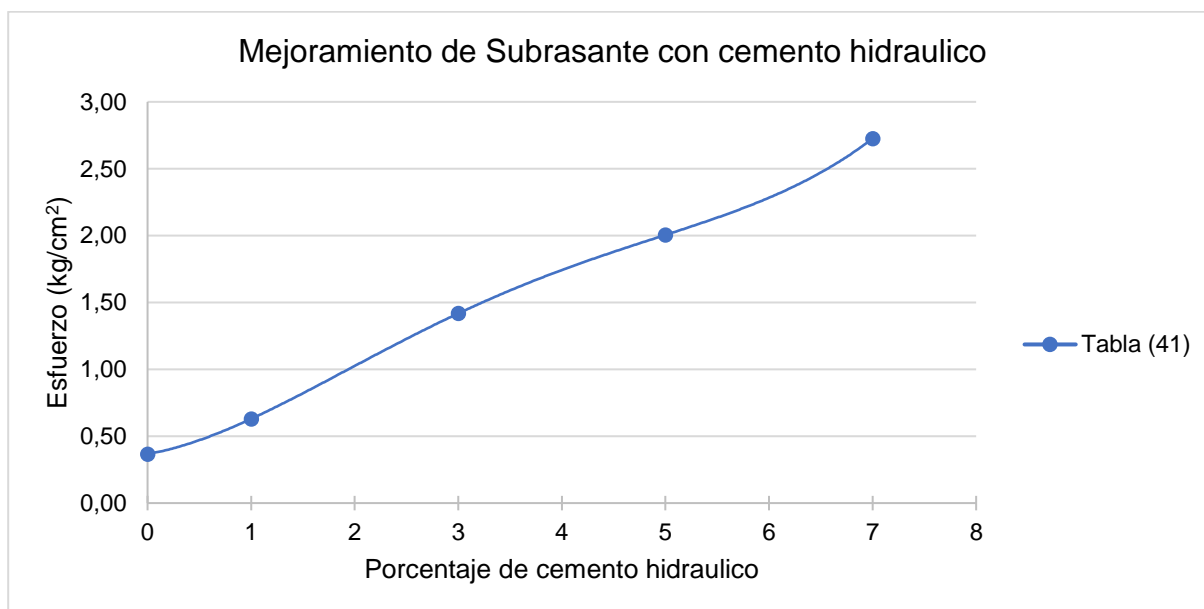


Tabla 42. Datos de la zona de <i>Nicoya</i> sobre falla a la compresión inconfiada de especímenes a 7 días					
Aplicación de Cemento	Moldes	Área (cm²)	Carga Aplicada (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm²)	Promedio Esfuerzo (kg/cm²)
0%	1	80,61	NR	-	0,05
	2	80,69	3,72	0,05	
	3	80,55	NR	-	

1%	1	80,31	9,18	0,11	0,15
	2	80,69	11,75	0,15	
	3	80,61	14,69	0,18	
3%	1	80,55	70,50	0,88	0,87
	2	80,55	67,93	0,84	
	3	80,67	72,34	0,90	
5%	1	80,61	94,00	1,17	1,11
	2	80,67	90,33	1,12	
	3	80,55	83,72	1,04	
7%	1	80,31	170,01	2,12	2,10
	2	80,69	178,46	2,21	
	3	80,55	158,63	1,97	

Gráfico 16. Esfuerzo por compresión inconfiada en la zona de *Nicoya* a siete días.

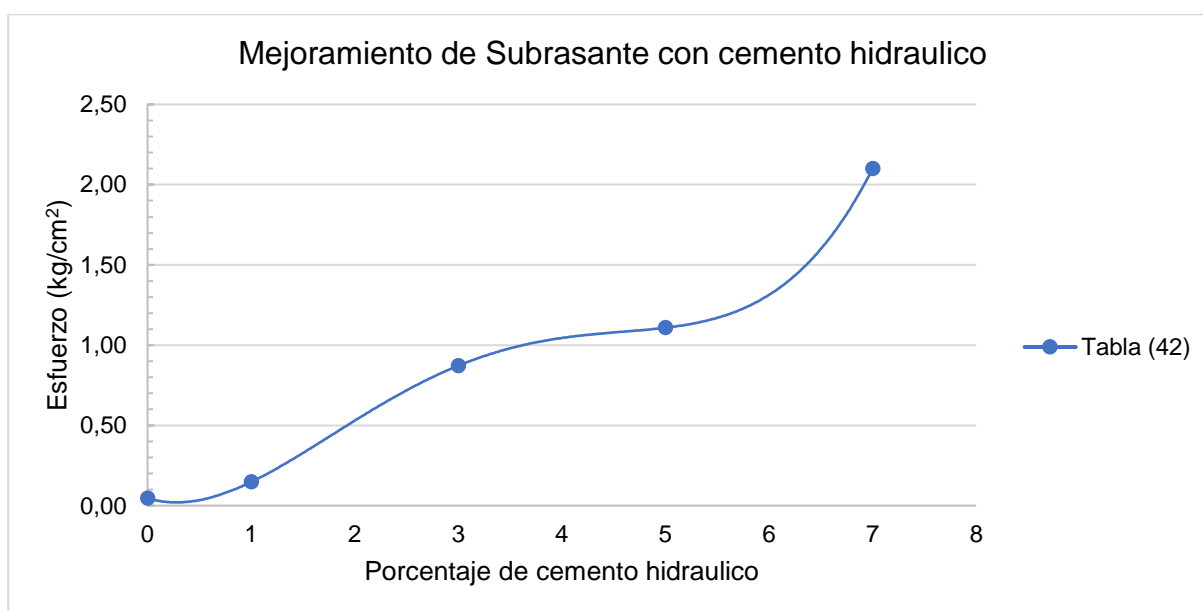
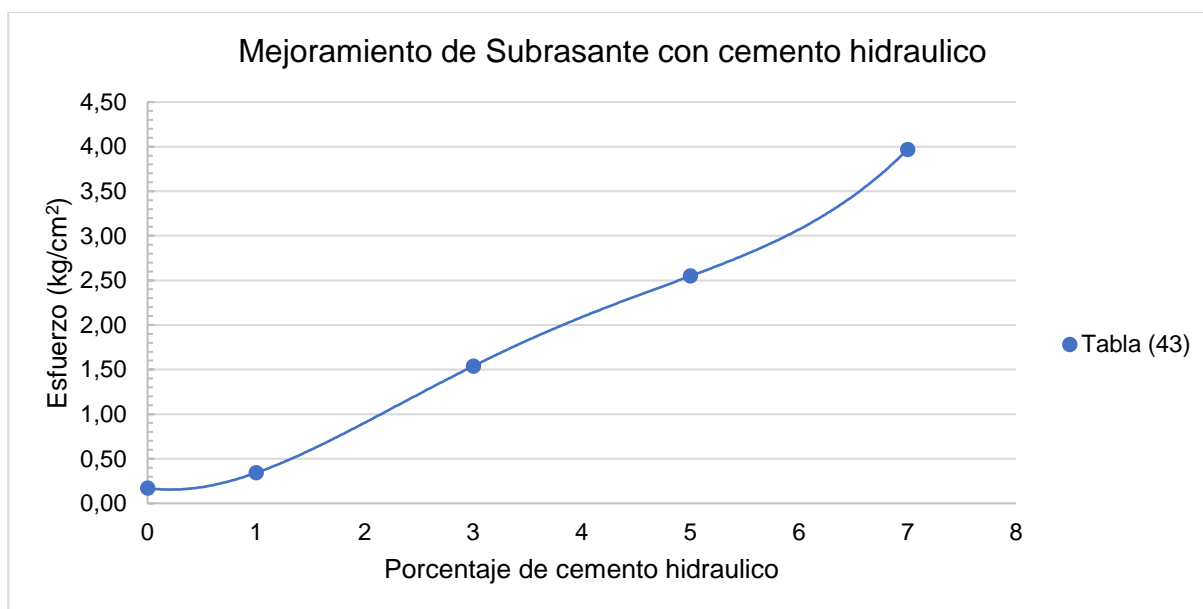


Tabla 43. Datos de la zona de <i>Pocosol</i> sobre falla a la compresión inconfiada de especímenes a siete días					
Aplicación de Cemento	Moldes	Área (cm²)	Carga Aplicada (kg)	Esfuerzo a la compresión (kg/cm²)	Promedio Esfuerzo (kg/cm²)
0%	1	80,67	16,65	0,21	0,17
	2	80,55	10,71	0,13	
	3	80,69	14,06	0,17	

1%	1	80,69	30,11	0,37	0,34
	2	80,31	29,01	0,36	
	3	80,61	23,50	0,29	
3%	1	80,67	124,48	1,54	1,54
	2	80,55	131,82	1,64	
	3	80,55	115,67	1,44	
5%	1	80,55	206,37	2,56	2,55
	2	80,69	197,55	2,45	
	3	80,61	212,24	2,63	
7%	1	80,69	316,53	3,92	3,97
	2	80,61	323,87	4,02	
	3	80,67	319,46	3,96	

Gráfico 17. Esfuerzo por compresión inconfiada en la zona de Pocosal a siete días.

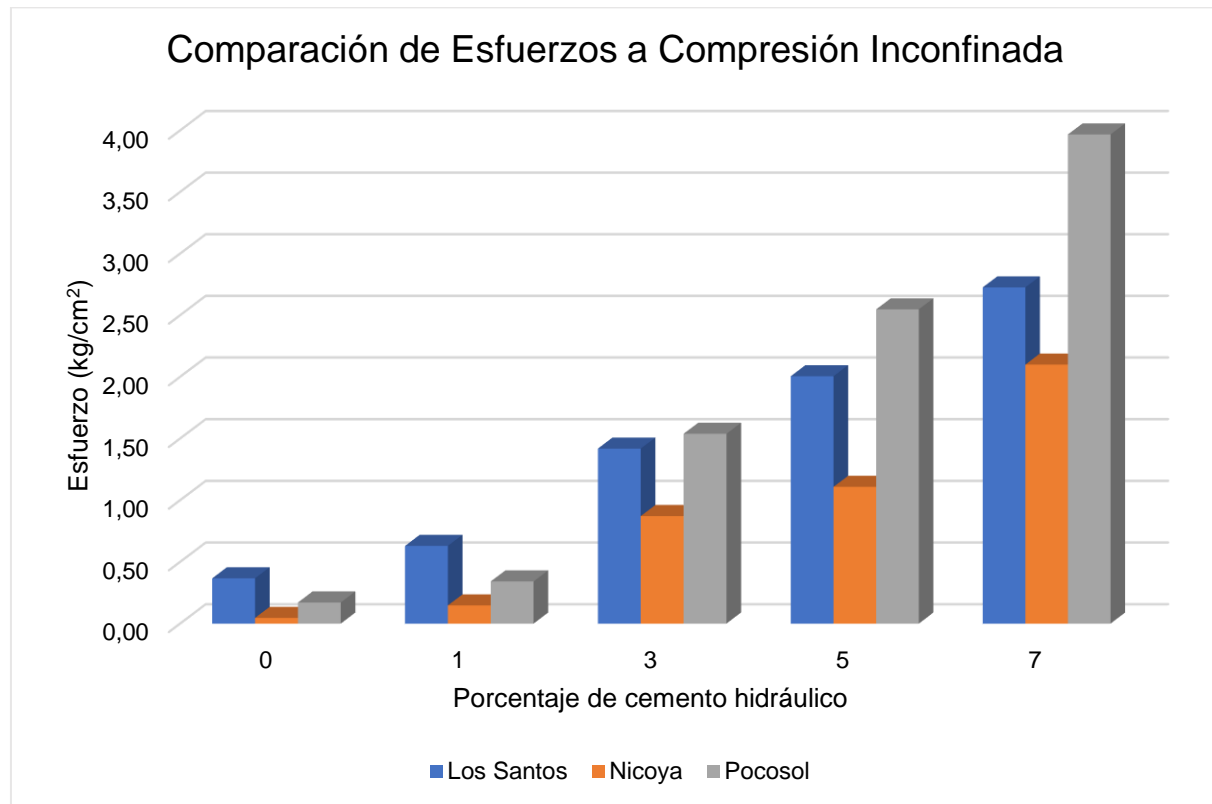


La siguiente tabla, proyecta una dosificación (con la ayuda de las ecuaciones de las rectas, en los gráficos 15, 16 y 17) la cual está de una

resistencia de 28 kg/cm² (2,75 MPa). Esto con el fin de determinar un requisito del CR-2010, en el apartado de “Estabilización de subrasantes”.

Tabla 44. Dosificación proyectada para obtener 28 kg/cm² (2,75 MPa)					
Santos		Nicoya		Pocosal	
Dosificación (%)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Dosificación (%)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Dosificación (%)	Esfuerzo (kg/cm ²)
13,2	29,20	11,2	29,04	11,5	28,52

Gráfico 18. Comparación de esfuerzos a compresión inconfiada en las tres zonas a los siete días de curado.



Pruebas de durabilidad en mezcla suelo-cemento hidráulico (Etapa 3)

En esta etapa como se mencionó en la metodología, se aplicarán dos pruebas. La primera de CBR y la segunda de desgaste. Ambas pruebas se desarrollaron con mezclas de suelo-cemento al 7%. Esto por ser las mezclas óptimas y con mejores resultados obtenidos.

Se realizó una comparación con parámetros que mencionan algunos manuales como el CR-2010, el cual es el “Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes” y el “Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras”.

La primera prueba (CBR) se mostrarán los cálculos por medio de tablas y gráficos, únicamente, para la mezcla de suelo-cemento al 7%, y se muestra una tabla comparativa con los CBR al 95% de compactación con la mezcla suelo-

cemento y virgen. Para iniciar el ensayo de CBR, se necesita una corrección por humedad, pero esta se emplea igual que con las pruebas de la etapa 2, consecuentemente la tabla no se colocará en los resultados. También se necesita tomar las mediciones de altura y diámetro para conocer el volumen. En los gráficos de esfuerzo vs penetración, se visualizan varias líneas verticales y horizontales de colores, estas hacen referencia a lo siguiente:

- Amarilla: Marca los puntos en penetración a 2,54 mm. y 5,08 mm.
- Azul: Es la corrección de la curva de 56 golpes.
- Anaranjada: Es la corrección de la curva de 25 golpes.
- Gris: Es la corrección de la curva de 10 golpes.

Tabla 45. Comprobación de Humedades para CBR en la zona de <i>Los Santos</i> con respecto a la humedad óptima (40,5%)			
	56 golpes	25 golpes	10 golpes
Peso envase (g)	104,92	103,46	66,54
Peso húmedo (g)	569,04	503,55	420,74
Peso seco (g)	436,32	388,87	318,01
Peso seco 2 (g)	436,52	389,20	318,22
% Error < 0,1%	0,05	0,08	0,07
Peso seco promedio (g)	436,42	389,04	318,12
% Humedad	40,01	40,10	40,79

Gráfico 19. Curva de Carga–Penetración con respectiva corrección para la zona de *Los Santos*.

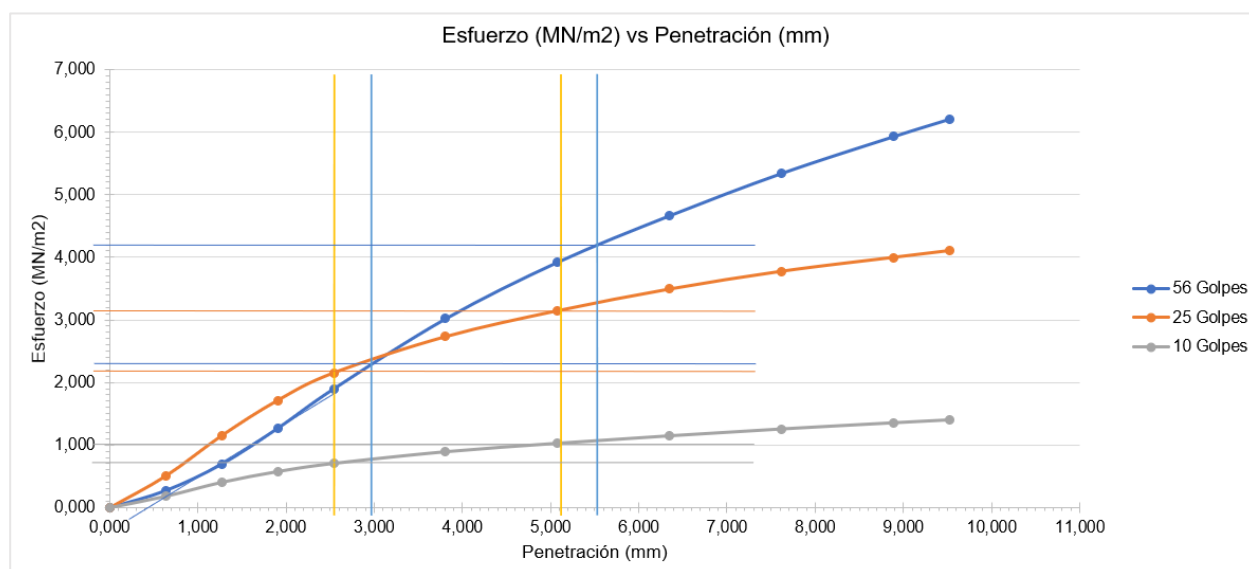


Gráfico 20. Cálculo de CBR al 95% de compactación en la zona de *Los Santos*.

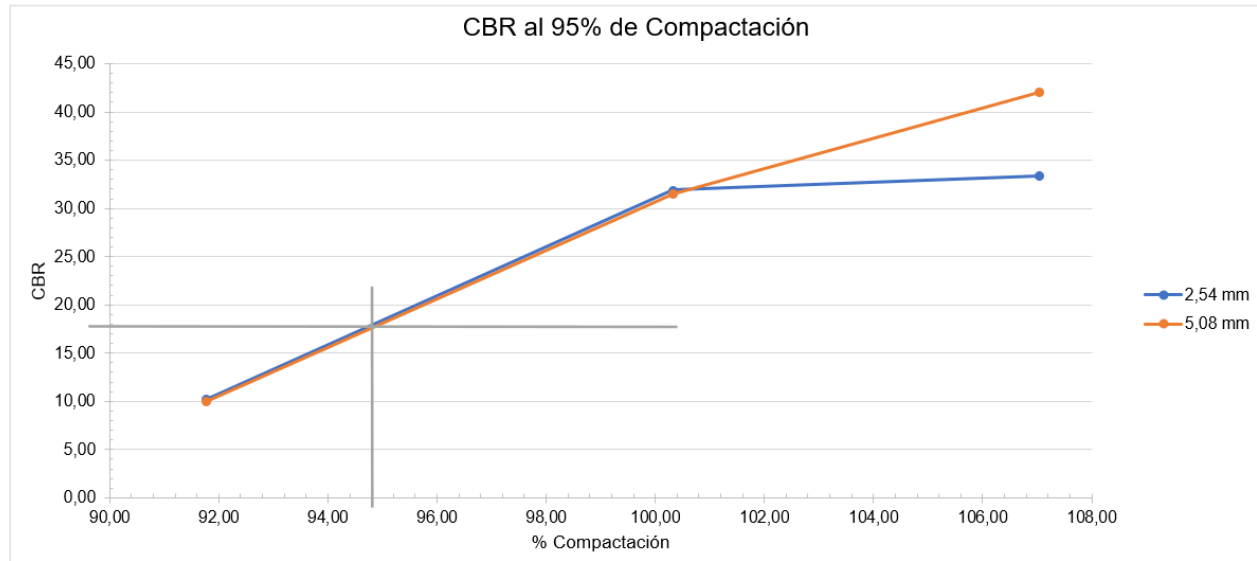


Tabla 46. Comprobación de Humedades para CBR en la zona de <i>Nicoya</i> con respecto a la humedad óptima (20,5%)			
	56 golpes	25 golpes	10 golpes
Peso envase (g)	111,58	65,22	112,34
Peso húmedo (g)	602,29	507,39	657,05
Peso seco (g)	515,33	433,71	568,33
Peso seco 2 (g)	515,74	434,08	568,85
% Error < 0,1%	0,08	0,09	0,09
Peso seco promedio (g)	515,54	433,90	568,59
% Humedad	21,48	19,93	19,39

Gráfico 21. Curva de Carga–Penetración con respectiva corrección para la zona de Nicoya.

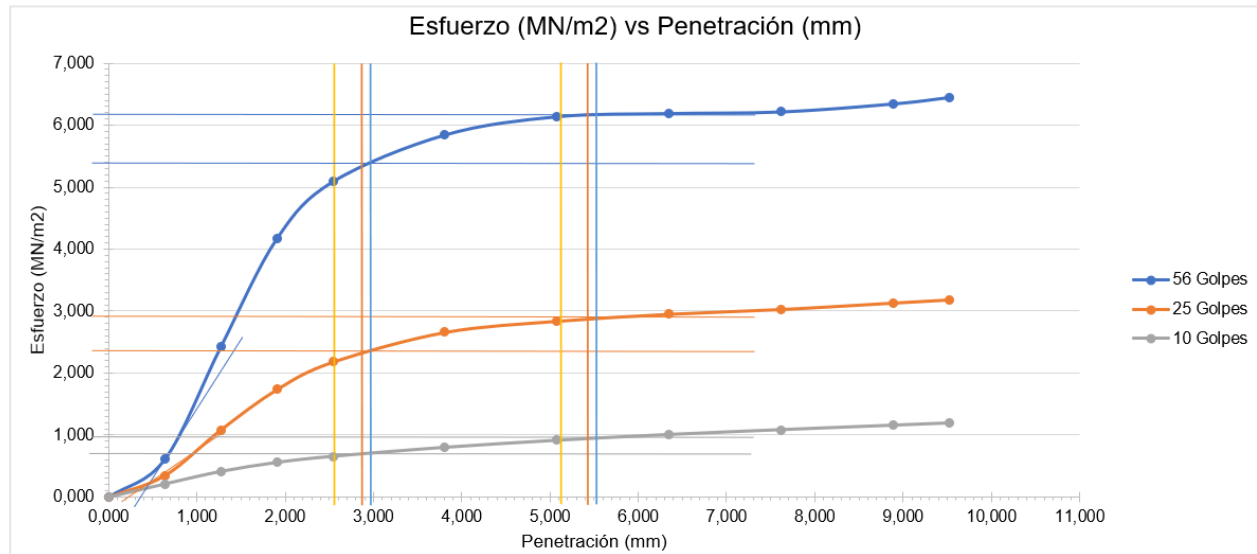


Gráfico 22. Cálculo de CBR al 95% de compactación en la zona de Nicoya.

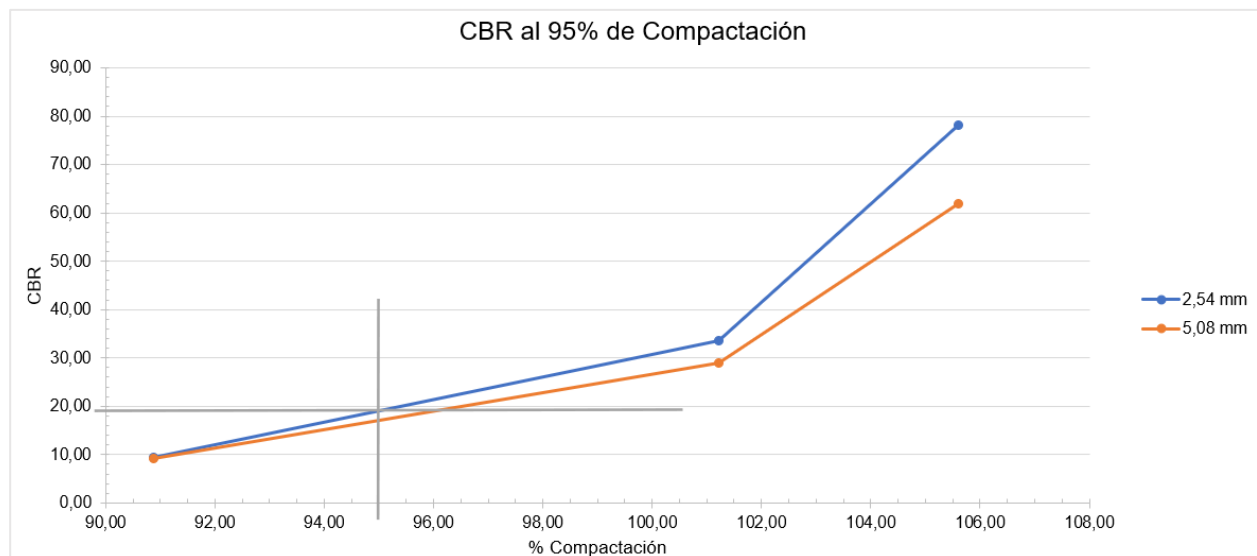


Tabla 47. Comprobación de Humedades para CBR en la zona de *Pocosol* con respecto a la humedad óptima (30,5%)

	56 golpes	25 golpes	10 golpes
Peso envase (g)	67,56	65,42	63,36
Peso húmedo (g)	585,92	448,45	479,78
Peso seco (g)	462,79	359,59	383,82
Peso seco 2 (g)	463,01	359,88	384,10
% Error < 0,1%	0,05	0,08	0,07
Peso seco promedio (g)	462,90	359,74	383,96
% Humedad	31,12	30,14	29,89

Gráfico 23. Curva de Carga–Penetración con respectiva corrección para la zona de *Pocosol*.

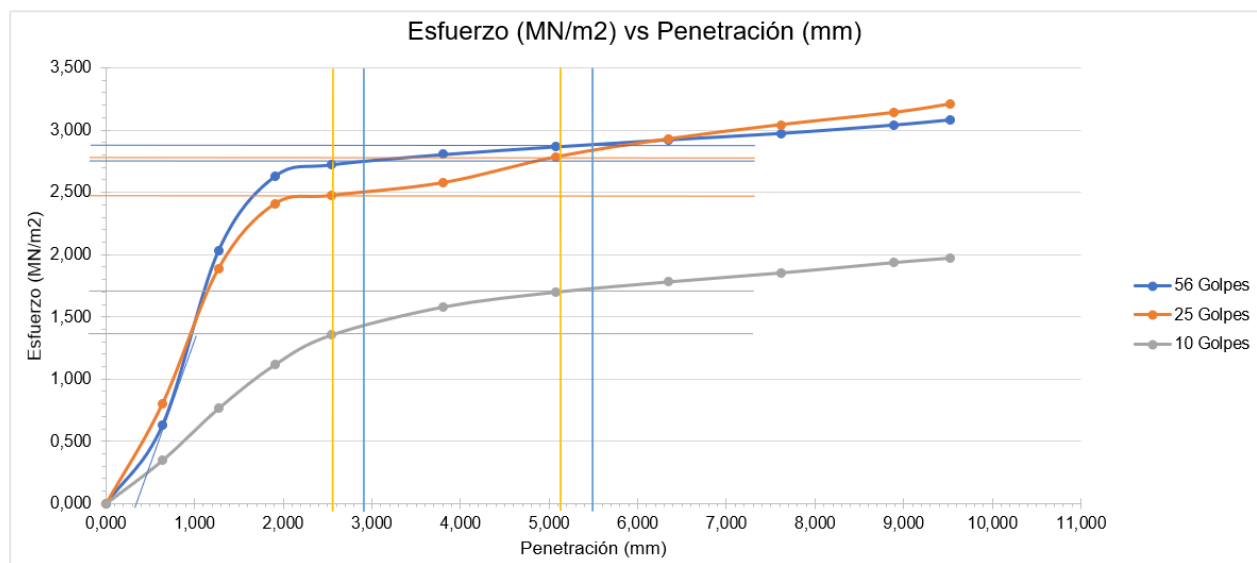


Gráfico 24. Cálculo de CBR al 95% de compactación en la zona de *Pocosol*.

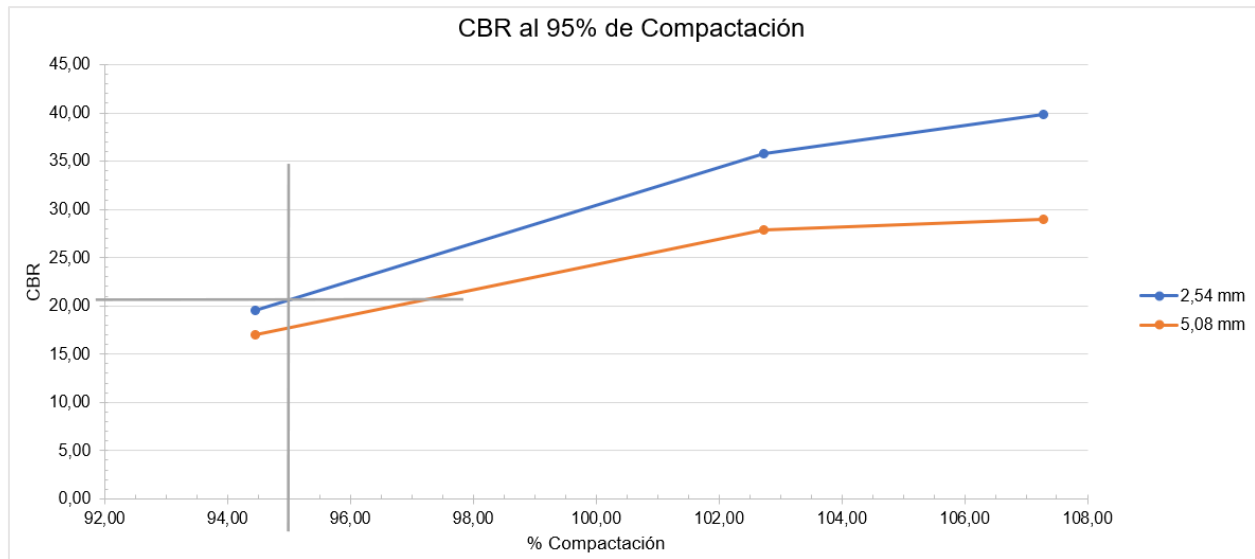


Gráfico 25. Comparación de CBR al 0% de cemento hidráulico contra CBR con mezcla suelo-cemento en las tres zonas.

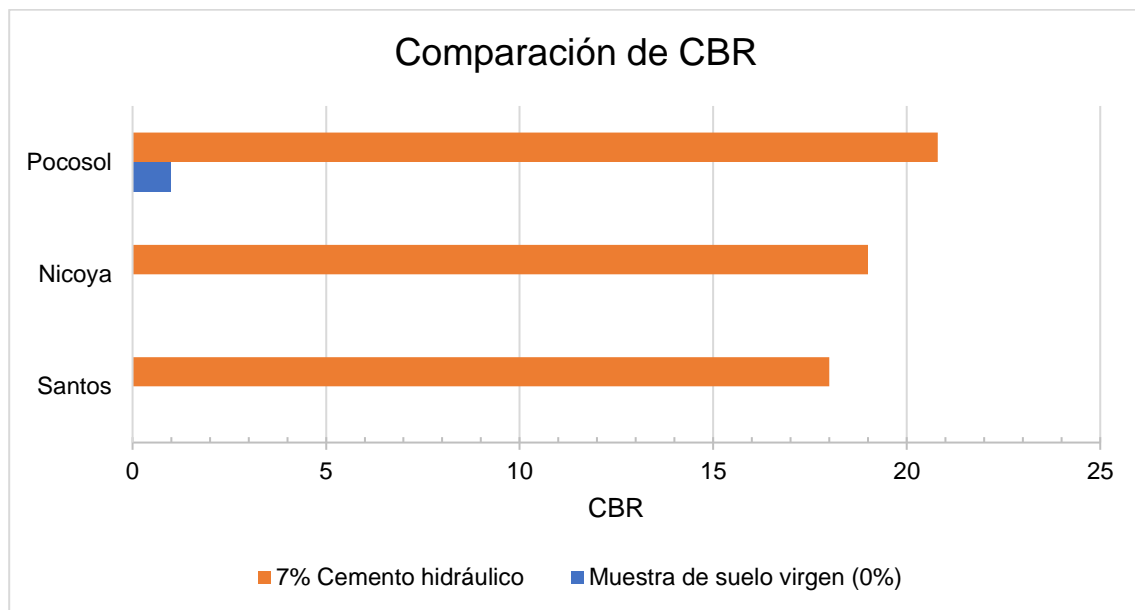


Tabla 48. Hinchamiento de los especímenes en la prueba de CBR en las tres zonas

Zona	56 golpes	25 golpes	10 golpes
Los Santos	7,5%	10%	10%
Nicoya	22,5%	25%	35%
Pocosol	7,5%	15%	40%

Para los cálculos del ensayo por desgaste se realiza una corrección por humedad que no va a ser presentada en los resultados, para no reiterar con tablas del mismo proceso.

También se realizó una iteración con el equipo de rotomartillo, como se explica en la metodología, para comprobar la correcta compactación con el Proctor Modificado. Las tablas siguientes muestran el proceso de como se itero el equipo, para encontrar una configuración apta que aplique una energía de compactación a igual o similar, al mazo de Proctor Modificado.

Además, los cálculos para encontrar el desgaste en los materiales de subrasante, las tablas para este calculo abarca, la correcta compactación de los cubos, comparando esta densidad seca, con la densidad seca máxima de la zona. Por último, se realiza el procedimiento en la máquina de los Ángeles (con los cubos en masa constante) para encontrar el desgaste de la mezcla suelo-cemento al 7%, en cada zona.

Tabla 49. Iteración de equipo (rotomartillo) para comprobación de compactación

	Molde #	Tiempo (seg)	Capas	Nivel de Velocidad	Peso + Suelo (g)	Densidad húmeda (kg/m³)	Densidad seca (kg/m³)	Densidad seca comparada (%)
Nicoya	2	40	5	1	16658	1461,3	1208,8	74,62
	3	120	5	1	16839	1508,9	1251,9	77,28
	4	60	8	2	17066	1567,3	1310,1	80,87
Santos	4	80	8	3	17274	1625,4	1167,2	94,51
	2	90	8	3	17523	1705,1	1214,3	98,32
	3	90	8	3	17455	1682,3	1198,1	97,01

Tabla 50. Compactación de mezcla suelo-cemento en moldes cúbicos en la zona de Los Santos

Cubo #	Tiempo (s)	Capas	Velocidad	Peso + Suelo (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m³)	Densidad seca (kg/m³)	Densidad Comparada (%)
4	90	8	2,5	17474,5	42,14	1681,305	1182,89	95,8
3	90	8	2,5	17328,1	40,29	1646,555	1173,67	95,0

Tabla 51. Obtención de masa constante de cubos y desgaste de la zona de Los Santos

Cubo #	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)
4	5433,9	5431,5	0,04	5432,70
3	5022,5	5021,4	0,02	5021,95
Cubo #	Peso después de desgaste (g)		Porcentaje de desgaste (%)	
4	1656,4		69,51	
3	1591,5		68,31	

Tabla 52. Compactación de mezcla suelo-cemento en moldes cúbicos en la zona de Nicoya

Cubo #	Tiempo (s)	Capas	Velocidad	Peso + Suelo (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m³)	Densidad seca (kg/m³)	Densidad Comparada (%)
3	90	8	2,5	18233,6	20,71	1901,484	1575,22	97,2
4	90	8	2,5	18271	21,32	1903,505	1569,05	96,9

Tabla 53. Obtención de masa constante de cubos y desgaste de la zona de Nicoya.

Cubo #	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)
3	5790,7	5786,7	0,07	5788,70
4	5805,2	5803	0,04	5804,10
Cubo #	Peso después de desgaste (g)		Porcentaje de desgaste (%)	
3	2811,4		51,43	
4	3172,9		45,33	

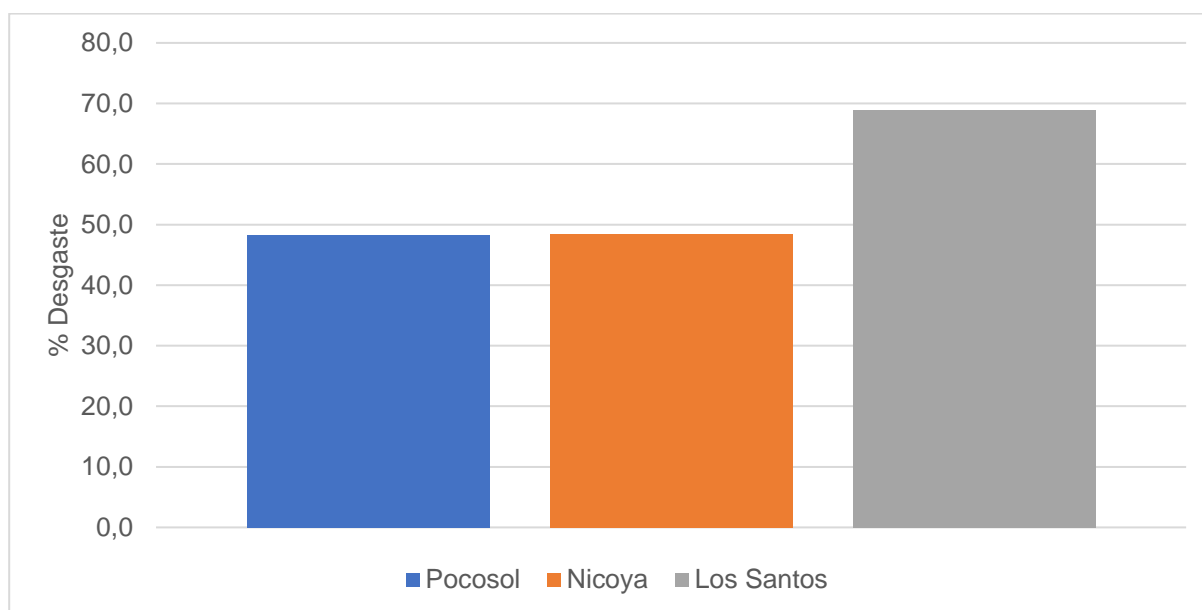
Tabla 54. Compactación de mezcla suelo-cemento en moldes cúbicos en la zona de Pocosal.

Cubo #	Tiempo (s)	Capas	Velocidad	Peso + Suelo (g)	%w	Densidad húmeda (kg/m ³)	Densidad seca (kg/m ³)	Densidad Comparada (%)
3	90	8	2,5	18430,3	29,14	1956,862	1515,35	112,4
3	90	8	2,5	18232	29,05	1901,034	1473,14	109,3

Tabla 55. Obtención de masa constante de cubos y desgaste de la zona de Pocosal.

Cubo #	Peso seco (g)	Peso seco 2 (g)	% Error	Peso seco promedio (g)
3	5621,2	5617,3	0,07	5619,25
3	5905,1	5902,2	0,05	5903,65
Cubo #	Peso después de desgaste (g)		Porcentaje de desgaste (%)	
3	2980,3		46,96	
3	2982,7		49,48	

Gráfica 26. Comparación de porcentajes de desgaste en las tres zonas con implementación de cemento hidráulico.



Proceso Constructivo

Para el siguiente proceso constructivo, se consideran parámetros que se toman de manuales, como el “Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras” y del “Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010)”. Para este proceso se señalarán puntos específicos, con una breve explicación del paso señalado.

Por ende, esta propuesta se abordará por pasos, para poder abarcar un amplio proceso a la hora de implementar esta mejora en una subrasante.

1. Realizar **ensayos de laboratorio**. Este paso inicial es fundamental para poder tomar las decisiones en cuanto al porcentaje de cemento hidráulico y las condiciones del suelo. Aspectos importantes como la humedad y densidad seca óptima del suelo a emplear la mejora. En dicho paso se debe realizar el diseño de la cantidad de sacos de cemento hidráulico por m².
2. Con los resultados brindados, en el sitio, se **prepara el terreno**. Se puede realizar una escarificación por medio de una motoniveladora, para poder, con ello distribuir de manera uniforme el cemento hidráulico, se toma una muestra de suelo y de la humedad del suelo en sitio, para aplicar la corrección por humedad.
3. Ya con el suelo pulverizado y suelto, se **distribuyen los sacos de cemento hidráulico** conforme al diseño establecido en el paso 1. Se pueden colocar los sacos completos para luego romper estos mismos y distribuirlos a lo ancho de todo

el carril en donde se implementará el mejoramiento.

4. Distribuido el producto, se procede a **mezclar el suelo con el cemento hidráulico**. De igual forma se puede contar con una motoniveladora para que realice esta acción de mezclado, para que se homogenice correctamente el aglutinante con el material granular. Es necesario señalar que en el momento que se aplica el cemento hidráulico en la subrasante, solo se cuenta con dos horas para terminar el proceso.
5. Realizado el paso anterior inmediatamente, se **hidrata la mezcla suelo-cemento** hasta cumplir con la humedad óptima, obtenida en el paso 1. Este ayuda a completar la homogenización.
6. Se procede con la **compactación de la subrasante**, se compactará hasta cumplir con la densidad seca óptima, obtenido en el paso 1.
7. El sellado de la vía se puede realizar con una dosis del cemento hidráulico y su hidratación correspondiente. En otros casos se puede colocar una capa de ligante bituminoso. Esto para producir una mejor trabajabilidad en la carpeta de rudo.
8. Por último, se emplea el debido curado, hidratando la vía no pavimentada por al menos veintiocho días, para que esta no sufra desecamiento.

No obstante, en todo el proceso se debe contar con el equipo de seguridad personal y de ser necesario, se realizan señalamientos de seguridad transitorios para garantizar el correcto paso vehicular. Se destaca que este proceso no siempre se va a cumplir exactamente como se mencionó, porque es una propuesta.

Análisis de los resultados

Se realizó el correspondiente caracterizado de los suelos de las tres zonas: Los Santos, Nicoya y Pocosol. Sin embargo, en la zona de Pocosol, se obtuvo dos tipos de suelos distintos. Anteriormente se explicó, que el suelo en donde transitan los vehículos, es el que tiene un aspecto rojizo, y el suelo gris que se encontró en el sitio, es un suelo entre 20 y 30 cm por debajo de este. En la etapa 1 (Caracterización de los suelos) se caracterizó el suelo gris, puesto que el rojizo ya contaba con una caracterización previa, elaborada por los laboratorios de CACISA.

Las tablas 7, 9 y 11 mencionan la preparación del material antes de realizar el análisis granulométrico. En este, se toma la humedad del material antes de realizar la prueba, para conocer la humedad en sitio que el material granular tenía en su momento. Luego se debe dejar sumergido el material en agua y con ello se realiza la prueba por lavado (ASTM D1140-17).

Teniendo el material lavado, se realiza el análisis granulométrico como se expresa en las tablas 8, 10 y 12. En estas tablas se puede observar que el TMN (Tamaño Máximo Nominal) es de 4,76 mm para las tres zonas. Puesto que, en todos los análisis el 100% del material granular pasa por el tamiz de 4,76 mm. de abertura, más una parte del material es retenido en la malla #10 el cual tiene una abertura de 2,00 mm.; por ende, se toma un tamiz mayor al retenido para garantizar el paso de este material por cualquier abertura mayor a los 4,76 mm.

La tabla 13 muestra que el análisis granulométrico fue realizado correctamente puesto que todos los porcentajes fueron menores al 1%. Si este error fuera menor al 1%, se debe repetir el ensayo. El mayor porcentaje de error, en el análisis granulométrico, se adjudica al suelo de la zona de Los Santos, con un 0,247%, los demás suelos no superaron el 0,10%.

La muestra con el menor porcentaje de suelo pasando por el tamiz #200 fue la zona de Los Santos, con un 42%, consecutivamente, el suelo gris de la zona de Pocosol, con un

porcentaje del 65%, luego la zona de Nicoya con 78% y por último la zona con el mayor porcentaje fue el suelo rojizo de la zona de Pocosol, con un 89%, esto indicado en la tabla 19.

El gráfico 2, muestra las curvas granulométricas de las tres zonas, y como se puede observar son muy similares entre sí, el suelo de Nicoya y Los Santos son prácticamente iguales, en el suelo de Pocosol (gris), se tiene una pequeña diferencia en el tamiz de 0,84 mm. de abertura (#20) ya que un 10% aproximadamente más del material paso por este tamiz que los otros dos, por lo que se puede ir especulando que los suelos van a obtener una clasificación muy equivalente.

Con la ejecución de los límites de Atterberg realizados (tablas 15, 16 y 17) y las curvas de flujo elaboradas (gráficos 3, 4 y 5) para las 3 zonas, la tabla 18, nos muestra el cálculo de los límites líquidos, plásticos e índices de plasticidad. Para estos límites se obtiene gran diferencia entre las tres zonas, sin embargo, estas dan límites líquidos mayores a cincuenta y el índice de plasticidad si difiere mucho.

Al obtener límites líquidos muy elevados (mayores al 50%) en las 3 zonas, quiere decir que la capacidad portante de estos materiales de subrasante, no es muy alta, y esta a medida que el límite líquido sea mayor, su capacidad portante disminuye. Por la razón que, si el suelo cuanta con un límite líquido cercano al 100%, el peso de las partículas sólidas del suelo, será igual al peso de la humedad contenida en él, como es el caso del suelo gris de la zona de Pocosol, que su límite líquido es de 116%, la zona con el menor límite líquido es la zona de Los Santos, con un límite líquido de 54%, es decir que las partículas sólidas del suelo pesan casi el doble que la humedad retenida en el material.

Los índices de plasticidad de las 3 zonas de estudio difieren mucho entre sí, como se denota en la tabla 19. Al disminuir este índice, el cambio de un estado semisólido, pasa al líquido con mayor velocidad, ya que ocupa menos humedad para

realizarlo. Como se aprecia en la zona de Los Santos, el índice es del 5%, por lo que lo hace sensible a los cambios de humedad. La zona de Nicoya sufre algo similar, ya que el índice es del 11%. No obstante, en la zona de Pocosol, su estado plástico se mantiene por un tiempo mayor, ya que sus índices superan el 20%, y ocupa una cantidad de humedad alta para realizar el cambio al estado líquido.

Para efectuar la clasificación de los suelos en las tres zonas, se resumen los datos necesarios en la tabla 19, en ella se incluye el suelo de Pocosol con aspecto rojizo, para determinar su clasificación también. Estos datos junto con la tabla 20, que proporciona la norma ASTM D3282-15 y con el cálculo del índice de grupo ya realizado se indica en la tabla 21.

Clasificados los materiales se puede observar que estos son materiales limo-arcillosos. Tienen diferencias entre sí, el material de Los Santos es un material moderadamente plástico, este también es muy elástico por su límite líquido de 66%. Los materiales granulares de Nicoya y Pocosol pueden producir altos cambios volumétricos por sus altos índices de plasticidad y también obtiene características del suelo de Los Santos por sus elevados límites líquidos.

La tabla 25, muestra un resumen de las densidades secas máximas y humedades óptimas, de las 3 zonas, en ellas se observa que la zona con la menor densidad seca, es la zona de Los Santos, con 1235 kg/m^3 , su humedad óptima es la mayor de todas, con 40,5%, es por su límite plástico tan alto (61%), que esta humedad llega a ser tan alta. Al contar con un índice de plasticidad de 5%, no permite obtener una alta densidad seca, por el cambio tan rápido en su condición. El suelo de Nicoya es lo opuesto, cuenta con la densidad seca más alta (1620 kg/m^3) y la menor humedad óptima (20,5%), esto por tener los límites de Atterberg más bajos de las 3 zonas de estudio.

En la zona de Pocosol, el suelo rojizo indica reducción en su densidad seca y un incremento en la humedad óptima, en relación al suelo gris de esta misma zona, por ende, el material rojizo, al tener propiedades mecánicas menores al suelo gris, se considera como más crítico y de igual manera se trabaja con suelos de su mismo tipo, ya que, su clasificación es la misma en ambos aspectos. Por lo tanto, se toma el suelo rojizo para la implementación del cemento hidráulico, ya que, al contar con una densidad seca menor, los resultados que brinde ya con la

mezcla suelo-cemento serán menores, que, si se realiza con el suelo gris, y lo que se quiere, es observar el aumento de las propiedades mecánicas, con la ayuda del cemento hidráulico. Al igual que sería la capa de rodamiento por donde transitan los vehículos de la propiedad.

Para iniciar la etapa 2 (Implementación de cemento hidráulico en materiales de subrasante) en los ensayos se debe realizar una corrección de agua por la humedad del material en sitio. Esta humedad es cambiante debido a las condiciones del ambiente en su momento, al no realizarla, no se respeta la humedad óptima, y con ello las densidades secas cambian.

Luego, el procedimiento de Proctor modificado se realiza igual para las tres zonas, las tablas 27 a la 30, muestran la elaboración de la prueba Proctor modificado con la implementación de cemento hidráulico para la zona de Los Santos, en ella se varía la relación A/C para obtener la óptima. Con esta se puede graficar los puntos de Proctor y las curvas de compactación nuevamente, como se aprecia en el gráfico 9, pero con la incorporación de los cuatro porcentajes de cemento hidráulico. En ella se aprecia, que las densidades secas oscilan con la densidad seca óptima que se obtuvo del suelo de Los Santos de 1235 kg/m^3 en la que su mayor densidad seca se encuentra en el porcentaje al 7% de cemento hidráulico. Y en el gráfico 10 se procede a calcular una curva con respecto a la relación A/C para alcanzar el contenido de agua por cemento hidráulico en cada porcentaje correspondiente, para los porcentajes de 1%, 3% y 5% la relación A/C es de 0,5, y para el contenido de 7% su relación es de 0,75. En los siguientes suelos (Nicoya y Pocosol) se emplea la misma estrategia.

En la zona de Nicoya el gráfico 11, se aprecia que las densidades secas, están por debajo de la densidad seca máxima, los porcentajes de 5% y 7%, son los más cercanos a conseguir esta densidad seca máxima, con valores de 1619 kg/m^3 y 1611 kg/m^3 respectivamente. El gráfico 12 se observa las relaciones de A/C en cada porcentaje. Para el 1% es de 0,5, los de 3% y 7% es de 0,75 y el de 5% es de 0,9.

El gráfico 13, de la zona de Pocosol, si muestra un ligero cambio en el contenido del 7% en cuanto a la humedad y densidad seca, conforme a los otros porcentajes de cemento hidráulico, la humedad del porcentaje de 7%, es la que se asemeja más a la humedad óptima del

suelo, sin embargo, las densidades secas, en todos los porcentajes son mayores a la densidad seca máxima del suelo natural, quiere decir, que el cemento hidráulico en corto tiempo, disminuye el límite líquido y por ello se proporciona un incremento en la densidad seca. El gráfico 14 recalca esta diferencia, pero la relación de A/C al 7% y 5% es muy baja con 0,2, le continúan las dosificaciones de 1% y 3% con 0,5.

Las tablas 41, 42 y 43, expresan los datos recopilados de la prueba de falla a compresión confinada que se realizó en las distintas zonas. Para cada zona se realizaron tres especímenes de falla en las cuales se encuentra un promedio de los tres, realizándose especímenes vírgenes y al 1%, 3%, 5% y 7% de cemento hidráulico por peso del suelo. En las tres zonas conforme se aumentaba el cemento hidráulico se aumentaba la resistencia, se visualiza mejor el comportamiento creciente en los gráficos 15, 16 y 17. En todos se aprecia un comportamiento creciente y un poco lineal, sin embargo, es polinómico al final, ya que la falla fue a siete días. Obteniendo las ecuaciones de recta para cada zona, en los gráficos (15, 16 y 17) se puede proyectar, el esfuerzo que puede llegar a tener, de acuerdo a la dosificación, por lo tanto, la tabla 44, señala la dosificación para obtener 28 kg/cm². Esta dosificación se obtiene, ya que en el apartado de “Estabilización de subrasantes” del CR-2010, dice que un requisito para una estabilización con cemento hidráulico, es que la resistencia a la compresión a 7 días sea de 28 kg/cm², la tabla nos indica que la dosificación de cemento hidráulico para la zona de Los Santos es de, 13,2%, la zona de Nicoya 11,2% y la zona de Pocosol 11,5%. Quiere decir que, con este cemento hidráulico, a bajas dosificaciones de cemento (sin entrar en la categoría de estabilización) se logran requisitos para optar por una estabilización según el CR-2010.



Figura 14. Fisuras o desprendimiento de material en especímenes de mezcla suelo-cemento

Para algunos cilindros con bajo contenido de cemento hidráulico o nulo, estos se fisuraban o se desprendía material en el curado de siete días. En la figura 14, se logran visualizar algunas fisuraciones que sufrían estos especímenes antes de la falla. Estas se pueden generar por una falta de adherencia de las partículas ya después del compactado, que se da por falta de aglutinante en la mezcla. Esto puede originar que la falla no desarrolle la máxima resistencia posible, en las dosificaciones bajas de cemento hidráulico. La tabla 42, se denota que en los especímenes vírgenes (0% de cemento hidráulico) dos de los especímenes no arrojaron datos, ya que se deterioraron en la cámara húmeda.

El gráfico 18, expresa la resistencia por porcentaje de cemento hidráulico y la zona respectiva. En él se garantiza el aumento de resistencia por aumento de contenido de cemento por peso del suelo. El suelo de Nicoya fue al que menos afectó el cemento hidráulico en estas bajas dosificaciones, siempre aumentó, pero el aumento que tuvo entre el 3% y 5% no es considerable. Sin embargo, el crecimiento en su resistencia a la compresión, desde el suelo virgen, es de más de un 4500%. Es decir que, de ser un suelo con casi nula capacidad soportante llega a obtener capacidad soportante, con dosificaciones de cemento hidráulico, que no superan el 7%. El suelo que mejor reaccionó este cemento hidráulico fue al de Pocosol, este tuvo un aumento en su resistencia, de un 1160% con respecto al 1%, y el suelo de Los Santos con respecto a suelo virgen tuvo un crecimiento de 742%. Por lo que, la reacción del cemento hidráulico con las subrasantes es apreciable y logra aumentar sus propiedades mecánicas.

Para la implementación de cemento hidráulico en su etapa 3, se evalúa la mezcla óptima de cada suelo, como es de esperar la mezcla óptima será al 7% en las tres zonas, ya que es la que obtiene mejores propiedades mecánicas.

Se inicia en la tabla 45, en donde se comprueba que los especímenes del ensayo de CBR, cumplen con la humedad óptima en la zona. Esta tiene una incertidumbre de 2%, por lo que puede estar entre 2% mayor o menor al óptimo. En la zona de Los Santos, sus humedades oscilan entre 40,01% y 40,79. No obstante, esto se cumple para las dos zonas siguientes, como se garantiza en las tablas 46 y 47. La zona de Nicoya con humedades entre 19,39% y 21,48%. La zona de Pocosol con humedades entre 29,89% y 31,12%.

El gráfico 19, muestra cómo fue ganando resistencia el suelo de Los Santos, mediante el pistón fue penetrando. En él se encuentran los esfuerzos a una penetración de 0,1 y 0,2 pulgadas, para con ello poder calcular el índice de CBR al 95%. Este índice se puede percibir en el gráfico 20, en él se denota que los esfuerzos en ambas penetraciones fueron muy similares y, por ello, el CBR se expresó de esa manera.

Los gráficos 21 y 23, corresponden a los suelos de las zonas de Nicoya y Pocosol respectivamente. En ellos también se aprecia el aumento de la resistencia conforme a la penetración. Sin embargo, el gráfico 23 de la zona de Pocosol, denota un comportamiento semejante en los especímenes de cincuenta y seis y veinticinco golpes. En el gráfico 22 se puede verificar que el CBR de la penetración a 0,1 pulgadas es mayor al de 0,2 pulgadas y, por ende, se toma el CBR de la penetración a 0,1 in. El gráfico 24, expresa lo mismo solo que con una amplitud mayor entre las dos penetraciones, no como el de Nicoya que se asemejaba al suelo de Los Santos en cuanto a la poca diferencia que existe entre los CBR de las dos penetraciones. A los gráficos 19, 21 y 23 se les realizó las correcciones para las curvas que necesitarán esta misma, y esta corrección se toma en cuenta, para dar origen al gráfico de CBR, ya que, se grafica mediante los esfuerzos en las penetraciones de 0,1 y 0,2 pulgadas.

Todo se puede representar mejor en el gráfico 25, donde se comparan los CBR sin la implementación y con la implementación de cemento hidráulico. En los especímenes sin contenido de cemento hidráulico, a la hora de calcular el CBR en la memoria de cálculo, no se representó adecuadamente, quiere decir, que al tener tan poca resistencia, las gráficas no se logran apreciar bien, puesto que son casi nulas. Se refiere a que el gráfico en la zona de la variable dependiente, era de 0. El dato que se tenía por la caracterización del suelo en Pocosol se dice que es de 1. Por lo tanto, es el único que arroja resultado para los especímenes vírgenes.

El hinchamiento obtenido de la prueba de CBR, se puede ver reflejado con el tipo de suelo, en la tabla 48, se aprecia el hinchamiento por zona. Como se mencionó en las zonas de Nicoya y Pocosol, por el tipo de suelo, tienden a realizar cambios volumétricos razonables, y se aprecia con el comportamiento del hinchamiento. Este, a medida que se disminuye la compactación se

hincha más el material; no obstante, en Nicoya aun con los cincuenta y seis golpes por capa, el cual supera el 100% de compactado, sufre cambios volumétricos altos. En la zona de Los Santos estos cambios volumétricos no son tan perjudiciales. En la zona de Pocosol el suelo si sufre un hinchamiento alto, pero compactado, este se disminuye considerablemente. Por ende, estos tipos de suelo, si concuerdan con lo especificado anteriormente en la clasificación de suelos.

Por otro lado, el CR-2010 indica que el CBR mínimo para una sub-base debe ser de al menos treinta, como se interpreta en el gráfico 24, estos crecimientos con la aplicación de cemento hidráulico, en dosificaciones del 7%, llegan a conseguir un CBR de veinte, específicamente en la zona de Pocosol, la zona de Los Santos, un CBR de dieciocho y Nicoya, un CBR de diecinueve. Como se aprecia si se aumenta el contenido de cemento hidráulico, considerando una estabilización, el CBR puede llegar a ser de 30, y tomar el valor de sub-base. No obstante, para el apartado de "Capas granulares de rodadura" en el CR-2010, especifica un CBR de 20, con este CBR, la zona de Pocosol, ya cumple con este criterio, y puede tomar la función de capa de rodadura.

Esto indica una disminución considerable en la plasticidad del suelo, el cual es aplicable para las tres zonas.

El ensayo de desgaste se inicia con la iteración del equipo del rotomartillo, porque la compactación con este equipo va a diferir mucho con el mazo de Proctor Modificado, esta iteración se aprecia en la tabla 49. También se sustituyen los moldes cilíndricos por moldes cúbicos, y es por tal razón se utiliza el rotomartillo, con una espiga de placa cuadrada para que, la compactación sea homogénea en todo el molde. Para la iteración se procede a realizar cubos variando la velocidad del equipo, el tiempo y las capas.

Las densidades secas comparadas se toman con la densidad seca óptima de cada suelo, por lo tanto, con el suelo de Nicoya, según la configuración de variables no se realizó una compactación tan efectiva. Sin embargo, con la configuración del suelo de Los Santos, si se logró conseguir porcentajes cercanos al 100%. Para dar como un dato confiable, se toma la configuración que lograra al menos un 95% de compactación con la densidad seca óptima del suelo. Ya cuando esta alcanza dichos porcentajes de confiabilidad se concluye y se utiliza esa configuración para

realizar los otros moldes. La configuración utilizada es de ocho capas por molde, noventa segundos por capa y en la velocidad tres del equipo.

Las tablas 50, 52 y 54, verifican que cada cubo cumpla con el porcentaje de confiabilidad al 95%, en su densidad seca, y de igual forma, con su respectiva humedad que no debe superar el 2% de incertidumbre con la humedad óptima.

Las tablas 51, 53 y 55 indican el proceso aplicando el ensayo de desgaste. Este porcentaje no debe superar el 50%, esto se indica en el CR-2010 en el apartado de capas granulares de rodadura y en el Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, esto para que la abrasión del paso vehicular no dañe la capa de rodamiento. Por lo tanto, de las tres zonas, una de ellas no cumple con lo indicado.

Se puede evaluar mejor en el gráfico 26, que se aprecia mejor que tipo de suelos sobrepasan la línea del 50%. Los suelos de Pocosol y Nicoya se mantienen por debajo de la línea y Los Santos sí sobrepasa la línea por un 10% aproximadamente. Estos suelos al colocarlos en la máquina de los Ángeles, pierden su integridad de adherencia y se destruyen, de ello, al desmoronarse se observa que partículas pequeñas sí quedan adheridas entre sí.

Indica que, con bajos contenidos de cemento (7% máximo) aplicados en suelos granulares muy finos, con porcentajes de más del 45% del suelo, pasando por el tamiz #200 sí se puede estar bajo parámetros indicados en manuales nacionales e internacionales en condiciones de desgaste.

Conclusiones

- Se logra clasificar el tipo de suelo para cada zona correspondiente. La zona de Los Santos como A-5 (1), Nicoya como A-7-5 (12) y Pocosol como A-7-6 (34). En donde se determinan materiales limo-arcillosos con tamaños máximos nominales de 4,76 mm.
- El incremento en resistencia es apreciable conforme se aumenta el cemento hidráulico en todas las zonas. Las resistencias sin cemento hidráulico, de las zonas de Los Santos, Nicoya y Pocosol, son de 0,37 kg/cm², 0,05 kg/cm² y 0,17 kg/cm² respectivamente, las resistencias a 7% de cemento hidráulico, son de 2,73 kg/cm², 2,10 kg/cm² y 3,97 kg/cm² respectivamente.
- La zona con mejores resultados de la implementación de cemento hidráulico es Pocosol, ya que sus propiedades mecánicas son superiores a las otras 2 zonas.
- Se logra obtener requisitos de resistencia a la compresión en el apartado de estabilización del CR-2010, sin superar dosificaciones de cemento hidráulico mayores al 15%.
- La plasticidad de los materiales de subrasante se disminuye gracias al cemento hidráulico, y con ello repercute en el incremento del CBR.
- El incremento del CBR en la zona de Pocosol, cumple con parámetros del CR-2010 en el apartado de "Capa granulares de rodadura", teniendo un CBR de 20,8.
- En la zona de Nicoya y Pocosol, el desgaste de los materiales granulares con la mejora de suelo-cemento cumplen con lo indicado en CR-2010, sin superar el 50% de desgaste y con ello es aplicable para una capa de rodadura.
- La resistencia no está vinculada con la durabilidad de la mezcla suelo-cemento, ya que, a medida que la resistencia incrementa la durabilidad no se afecta directamente
- No se implementa el mejoramiento en campo, sin embargo, se obtienen resultados a escala de laboratorio que comprueban que este se puede aplicar.

Recomendaciones

- Realizar otros ensayos (como la flexión en vigas), para obtener más datos con los que se pueda analizar otros parámetros.
- Verificar el proceso constructivo de la implementación en campo para detallar mejor el proceso.
- Realizar un paño de prueba en condiciones de sitio para verificar si cumple lo establecido en laboratorio y con ello correlacionar los datos.
- Aumentar el porcentaje de cemento hidráulico, en condición de una estabilización, para cumplir como sub-base bajo parámetros nacionales (CR-2010).
- Aplicar ensayos químicos en las zonas, para poder determinar si agentes químicos como pesticidas afectan el cemento hidráulico, en su reducción de su resistencia.

Apéndices

- Apéndice 1. Tabla para muestreo en campo en las zonas de estudio.

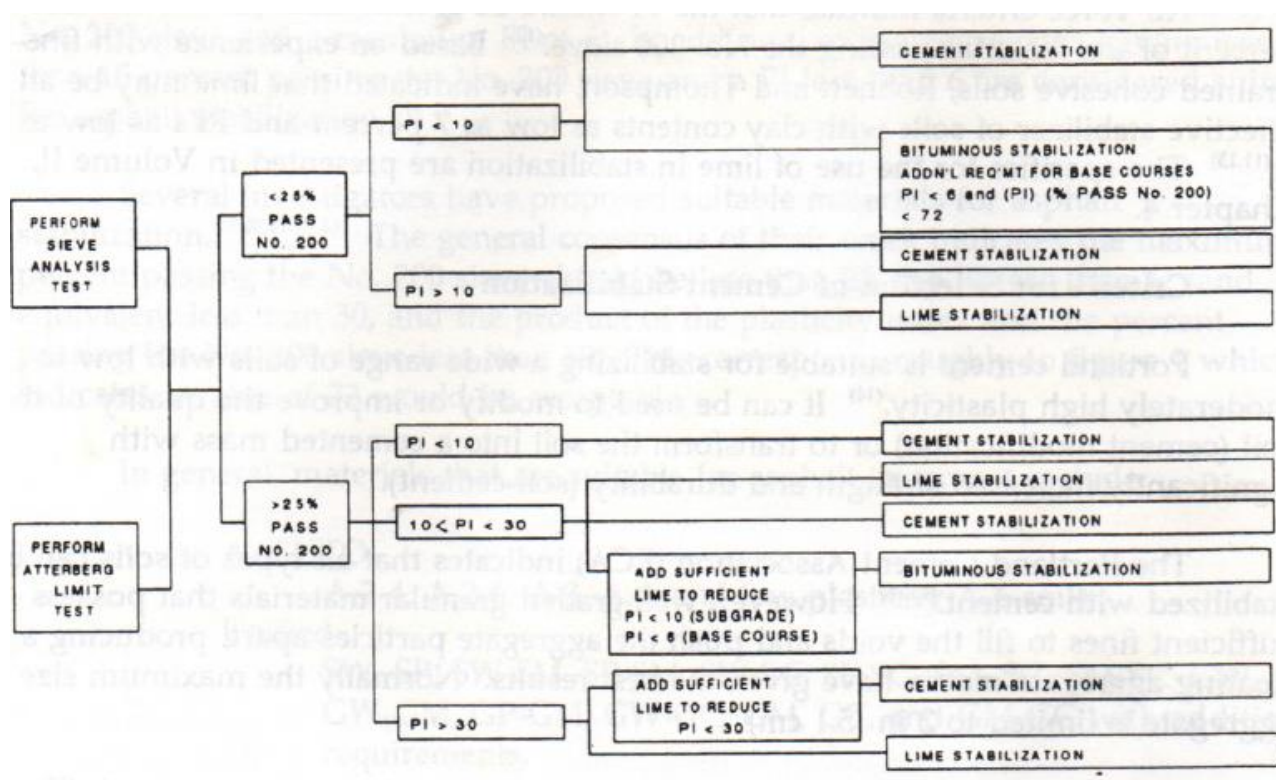
Muestreo en Subrasante						
Gira			Lugar			
Fecha						
Hora de inicio				Hora final		
Ubicación del camino a muestrear						
Longitud del carril (m)			Ancho del carril (m)			
Cantidad de kg total aprox.						
Tabla para ejecución del muestreo	Muestra	Incremento	# Aleatorio	Long (m)	# Aleatorio	Ancho (m)
Observaciones						

Anexos

Anexo 1. Informe técnico del laboratorio de CASISA, hacia el suelo de la zona de Pococol.

- Fecha del Informe: 19 de abril de 2018
- Serie del Informe: INF. 1389-2018
- Empresa Dirigida: Holcim de Costa Rica
- Contenido del Informe: Caracterización de Material (Subrasante)
- Datos obtenidos del informe:
 - Análisis Granulométrico
 - Límite Líquido
 - Índice de Plasticidad
 - Densidad Seca Óptima (kg/m^3)
 - Humedad Óptima
 - CBR al 95%

Anexo 2. Se adjunta el Sistema de Índice de Estabilización del Suelo (SSIS) por parte de la Universidad de Texas, en el cual se sustenta una parte del proyecto.



Fuente: Dunlap, W (1975)

Anexo 3. Normas ASTM y AASTHO utilizadas para el desarrollo de los ensayos empleados.

- ASTM D4318-17
- ASTM D3665-12
- ASTM D3282-15
- ASTM D2216-19
- ASTM D1883-16
- ASTM D1633-17
- ASTM D1557-12
- ASTM D1140-17
- ASTM D854-14
- ASTM D420-18
- ASTM D75-D75M-14
- ASTM C702/C702M-18
- ASTM C131/C131M-14
- ASTTTHO T 88-13

Referencia

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). *AASHTO T 88-13: Standard Method of Test for Particle Size Analysis of Soils*. United States of America.
- American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM C131/C131M-14: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. United States of America.
- American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM D75/D75M-14: Standard Practice for Sampling Aggregates*. United States of America.
- American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM D854-14: Standard Tests Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. United States of America.
- American Society for Testing and Materials. (2015). *ASTM D1557-12: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*. United States of America.
- American Society for Testing and Materials. (2015). *ASTM D3282-15: Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. United States of America.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM D1140-17: Standard Test Methods for Determining the Amount of Material Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Soils by Washing*. United States of America.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM D4318-17: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. United States of America.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM D1633-17: Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders*. United States of America.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM D3665-12: Standard Practice for Random Sampling of Construction Materials*. United States of America.
- American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM D1883-16: Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils*. United States of America.
- American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM C702/C702M-18: Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. United States of America.
- American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM D420-18: Standard Guide for Site Characterization for Engineering Design and Construction Purposes*. United States of America.
- American Society for Testing and Materials. (2019). *ASTM D2216-19: Standard Tests Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. United States of America.
- Campos, C. (2010). *Construcción y conservación de caminos en lastre*. San José.

- Castro, P. (2017). *Apuntes del Curso de Diseño de Pavimentos*. Costa Rica: Tecnológico de Costa Rica.
- Coronado, J. (2004). *Condiciones Generales y Especificaciones Técnicas para Actividades de Mantenimiento contratados con base en Precios Unitarios*. Guatemala.
- Das, B. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4a. ed.). México, D.F.: CENGAGE Learning.
- Dunlap, W. (1975). *UNITED STATES AIR FORCE SOIL STABILIZATION INDEX SYSTEM*. Texas: National Technical Information Service. Extraído de: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a004876.pdf>
- Elizondo, F., & Sibaja, D. (2008). *Guía para la Estabilización o Mejoramiento de Rutas No Pavimentadas*. San José.
- Fonseca, J. (2010). *Resistencia a la abrasión superficial de un suelo no cohesivo estabilizado con cemento* (Licenciatura). Tecnológico de Costa Rica.
- Gómez, L., Guillin, W., & Gallardo, R. (2016). *Variación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos compresibles estabilizados con material cementante*. Revista Tecnura.
- Higuera, C., Gómez, J., & Pardo, Ó. (2012). *Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio*.
- INEC. (2010). *Costa Rica: Longitud en kilómetros de carreteras y caminos según clase y tipo de superficie de rodamiento 2004-2010*. Recuperado el 10 de mayo de 2018.
- Instituto Costarricense del Concreto y del Cemento. (2017). *Resumen del procedimiento del diseño de mezclas para pavimentos UNICAPA según la metodología del ISCYC*. San José.
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. (2013). *Propuesta de Proyectos de Investigación Relacionados con Concreto Hidráulico* (pp. 1-13). San José.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes*. San José.
- Quintanilla, C. (2007). *Pavimentos Unicapa de Alto Desempeño*. Presentación, Salvador.
- Secretaría de Integración Económica Centroamericana. (2010). *Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras con enfoque de gestión de riesgo y seguridad vial*.
- Toirac, J. (2008). *EL SUELO-CEMENTO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN* (pp. 520-571). Santo Domingo.